



TITLE:

精密写真測量の斜面モニタリングへの適用(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

村上, 治

CITATION:

村上, 治. 精密写真測量の斜面モニタリングへの適用. 京都大学, 2008, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2008-11-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k14225>

RIGHT:

精密写真測量の斜面モニタリングへの適用

村上 治

目 次

第1章 序論	1
1. 1. 研究の背景と目的	2
1. 2. 論文構成	6
参考文献	8
第2章 写真測量と斜面モニタリング	9
2. 1. 概説	10
2. 2. 写真・航空機・計算機	10
2. 3. ステレオ航空写真による地形計測	12
2. 4. 立体写真測量	14
2. 5. フリーネット解法と変移量計測	15
2. 6. 土木分野で実施する精密写真測量の手順	16
2. 7. 斜面モニタリングの目的と手法	20
2. 7. 1. 孔内傾斜計	21
2. 7. 2. 伸縮計	22
2. 7. 3. GPS測量	22
2. 7. 4. 光波測量	23
2. 8. 道路のり面の管理基準	24
参考文献	26
第3章 写真測量の基本原則	27
3. 1. 概説	28
3. 2. 共線条件	28
3. 3. 共線条件式	29
3. 4. 共線方程式の線形化	31
3. 5. 線形化された共線方程式の解法（バンドル調整計算法）	34
3. 6. レンズ歪みとセルフキャリブレーション	37
3. 7. 後方交会法による単写真標定	39
参考文献	42
第4章 精度の評価	43
4. 1. 概説	44
4. 2. 内的精度（計算精度）	44
4. 3. 内的精度と外的精度	45
4. 4. 読取精度	45
4. 5. 精度の経験式	46
4. 6. 解析システムの開発	48
4. 7. 模擬のり面での変位量計測試験	48
4. 7. 1. 実施概要	48

4. 7. 2. 実施結果	56
4. 8. 精密写真測量と鋼巻尺および光波測量との比較	67
4. 8. 1. 鋼巻尺・光波測量との結果の比較	68
4. 9. 計測精度と計算精度（内的精度）の考察	69
4. 10. L/f 値の評価	71
4. 11. フィールド実験結果の総括	71
4. 12. カメラ機種、撮影方法の違いによる精度の比較	72
4. 13. 全体の精度と点の精度	79
4. 14. まとめと問題点	81
参考文献	82
第5章 精密写真測量による斜面モニタリング	83
5. 1. 概説	84
5. 2. 精密写真測量によるのり面モニタリング	84
5. 2. 1. 道路「のり面」のモニタリング業務	84
5. 2. 2. のり面点検概要	85
5. 2. 3. のり面モニタリングの実施時期	87
5. 2. 4. 点検方法の比較	87
5. 2. 5. 光波測量との比較	89
5. 2. 6. 従来計測における管理基準	90
5. 2. 7. ターゲットの選定	91
5. 2. 8. 解析結果の管理基準	95
5. 3. 複数回計測の比較と管理	97
5. 3. 1. 変移量図	97
5. 3. 2. 面ひずみ図	99
5. 4. トンネル掘削現場での地表面変位計測	102
5. 4. 1. 現場状況	102
5. 4. 2. 計測結果	104
5. 4. 3. トンネル掘削と地表面の変位	105
5. 5. まとめ（課題と解決法）	107
5. 5. 1. 作業効率の低下に対する対策	108
5. 5. 2. 解析結果の良否の判定に対する対策	108
参考文献	108
第6章 カラーターゲットによる処理手順の自動化	109
6. 1. 概説	110
6. 2. 基本システムの作業手順	110
6. 3. ターゲット位置特定の手順	111
6. 4. ターゲットの位置と番号の特定	112
6. 5. 画像データの色空間	114

6. 5. 1. 代表的な色空間表記法	115
6. 5. 2. デジタルカメラ画像の特徴	118
6. 5. 3. RGB 系の色空間の特徴	118
6. 5. 4. HSV 系の色空間の特徴	120
6. 5. 5. RGB ベクトルと色相 (H)、彩度 (S) との関係	122
6. 5. 6. RGB から HSV への変換アルゴリズム	122
6. 6. カラーターゲットの自動検出	124
6. 6. 1. HSV 系の色空間における特定色の検出	124
6. 6. 2. カラーターゲットの検出	125
6. 7. フィールドテスト	127
6. 7. 1. カラーターゲットの設置	127
6. 7. 2. カラーターゲットの判別基準	128
6. 8. まとめ	133
参考文献	134
第7章 シミュレーターによる計測誤差の推定	135
7. 1. 概説	136
7. 2. 従来の問題点	136
7. 3. シミュレーションの原理	136
7. 4. シミュレーション実施手順	138
7. 5. プログラムによる作業	140
7. 6. 動作検証結果	142
7. 7. まとめ	147
参考文献	148
第8章 現場への適用	149
8. 1. 概説	150
8. 2. カラーターゲットによる効率化の現場への適用	150
8. 2. 1. 計測位置と範囲	150
8. 2. 2. 計測結果	152
8. 2. 3. カラーターゲットによる推定処理のまとめと問題点	154
8. 3. シミュレーションによる精度検討の現場への適用	156
8. 4. 施工現場における精度向上策の検討	158
8. 5. 施工現場における変位計測	160
8. 6. まとめ	162
第9章 まとめ	163
9. 1. まとめ	164
9. 2. 課題	165
9. 3. 今後の展望	168
謝辞	

第 1 章 序論

1. 1. 研究の背景と目的

日本は活発な地質活動により国土の約7割が急峻な山地で形成されており、平地部についてはほとんどが既に経済活動に利用されている。そのため、経済圏を結ぶ輸送手段としての道路は、自然斜面あるいは切土のり面（以下「のり面」と呼ぶ）等に隣接して建設されている場合が多い。特に、高速道路においてはその用地獲得の困難さから、新規に建設される高速道路は平地部よりも山地・山麓に建設の主体が移行しており、「のり面」が長大化する傾向にある。一方、日本は地理的な特性から、斜面崩壊や地すべりの誘因となる台風、大雨といった気象条件、活発な地質活動による地震発生の可能性という問題も抱えている。このように国土の広範囲の地域で土砂災害に見舞われやすい環境にあるため、道路利用者の安全を確保する「道路防災」に対する要求は大きく、その重要性も非常に高い。中でも道路の「のり面」は、その管理延長の増大および「長大のり面」の増加に伴い、限られた保守・予防の予算範囲内でいかに効率的にのり面を点検し維持管理していくか（「のり面モニタリング」の実施）が管理サイドの重要な課題となっている。

例えば、比較的整備の行き届いている高速道路の「のり面モニタリング」を業務として考えた場合、点検者が個々の「のり面」を巡回して目視で点検するのが着実な方法ではあるが、これをすべての「のり面」で実施するには、時間を費やすだけでなく人的なコストが多く発生するため、継続的なモニタリングの実施は困難である。このため、定期巡回点検において変位・変形の危険性が高いと判定された「のり面」においては計測機器を用いて継続的に変位を計測する管理手法が適用されているが、やはり機器設置のコストの面から管理「のり面」のすべてをカバーすることは不可能である。また、従来の「のり面」の変位を計測する手法では、伸縮計などによる点や線の変位計測はできるが、全体的な「のり面」の変位を面として捉えることが困難である。光波測量やレーザプロファイラーによる計測などでは、多数の測点を計測することで面の計測を行うことは可能であるが、測定に時間や高度な技術およびコストがかかる。またレーザプロファイラーの計測結果では、計測対象点の位置特定の困難さから同一点の時系列的な変化を確認することが難しい、といった問題があり、定周期でのり面全体の変位計測を低コストで実現することは非常に難しい。

のり面モニタリングに必要とされる要求事項には以下のようなものがある。

1) 多くの点を簡便に低コストで計測することができる

モニタリングすべきのり面の数は、比較적으로よく整備されている高速道路だ

けを考えても数千箇所に入り、それらの中で、重点的に観察が必要なものだけでも数百箇所になる。これらに全て遠隔計測計器を設置することは、コスト的に不可能であり、計測作業者が現場で短時間に計測を行えることが必須の条件となる。

2) 計測作業者のスキルに関係なく一定の精度で計測ができる

高性能の計測器を使用する場合、機器によっては使用方法の習得が難しく、専門のエンジニアを要するものが少なくない。のり面モニタリングを専従とする作業員を確保できるのであればこれでもかまわないだろうが、実際には道路管理事務所・土木管理事務所等の職員が、不定期にその対応に当たることが多いため、専門技能を修得することが難しい。このため、運用手順書等により、最低限のスキルがあれば計測が可能であることが望まれる。

3) 計測位置から対象点までの距離が100m以上ある場合でも、高い精度で3次元座標を計測できること

特に高速道路のり面では、計測可能な位置が4車線程度の道路を挟んだ反対側ののり面上からということが多い。この場合最短でも50m以上の距離から計測せざるおえないため、離れた位置から精密に計測できる手法であることが必要条件となる。

4) 複数回の計測結果を基に面としての変位を把握することができる

基本的にのり面モニタリング業務は、その変位を計測するものである。1度の計測が高精度で実施できても、複数回の計測で相互のデータの位置同定の精度保証がなければ、その計測手法は利用価値が低く目的に適合しない。

5) 計測および解析を最小の人的コストで実現できる。

2)でも示したとおり、計測専従作業員ではない管理事務所の職員が現場計測作業や、計測後の後処理作業（解析作業）に充てられる時間は非常に限られている。このため、多少の時間がかかっても自動的に処理して結果が得られることが望ましい。もちろんリアルタイムで結果が得られればベストである。

これまでも、土木分野での精密写真測量による応用計測の研究や試験施行の試みは多くなされていて、トンネルの内空変位計測や岩盤崩落のモニタリング等では成果が発表されている。⁽¹⁾⁽²⁾

しかしながら、土木分野での適用については問題点もまだ多く、

1) 作業効率の問題

高精度の計測結果が要求されており、1計測あたりの写真撮影枚数が40枚～60枚程度と多くの画像を処理する必要があるが、解析計算を実施する前準備としての各写真のターゲットのナンバーリングおよび中心位置(2次元座標)決定に多大な作業時間を費やす必要が生じており、作業自体およびその結果のチェックのために作業者の負担が増加した。また、個々の写真の撮影位置および撮影方向の初期値を設定する作業についても写真枚数の増加がそのまま負担増に結び付く結果となっている。

2) 解析計算結果の適非を判断できない問題

手順書どおりに撮影を実施して、解析処理作業により結果を得たが、その結果についての評価が定量化されていないため、作業者は再計測が必要かどうかを判断できない。また、要求する精度を満足する解析結果を得るためには画像を何枚・何箇所から撮影すればよいかわからない。

といった項目が障害となって、精密写真測量法による計測は土木分野において積極的には利用されていないのが実情である。

現状では、作業効率の問題については専門のオペレータのスキルによりアプリケーションを最大限に効率よく使用することでカバーしているが、それでも1計測あたり2時間から4時間を要しており、複数ののり面を計測する場合、解析だけで1日を費やしてしまう場合もある。また、計算結果の評価については、経験的に設定した目標精度を指標として結果を判定し、精度が不足すれば写真の枚数や撮影位置を増やすといった、その場ごとの対処を行っていた。

このため、精密写真測量を多くの現場で普及させたいという要望に対して、誰もが簡便に使用できる技術ではないため、計画段階のコンサルティングとアプリケーションの使用方法の教育による作業者のスキルアップが必要とされていた。

本研究は、上記の「のり面モニタリング」の要求事項満足するための技術として、精密写真測量技術を適用しようとするものであり、特に高速道路のり面におけるモニタリング手法として、定期点検業務に適用ための手法の確立と土木分野における既存技術適用の問題点を解決するまでの過程をまとめたものである。

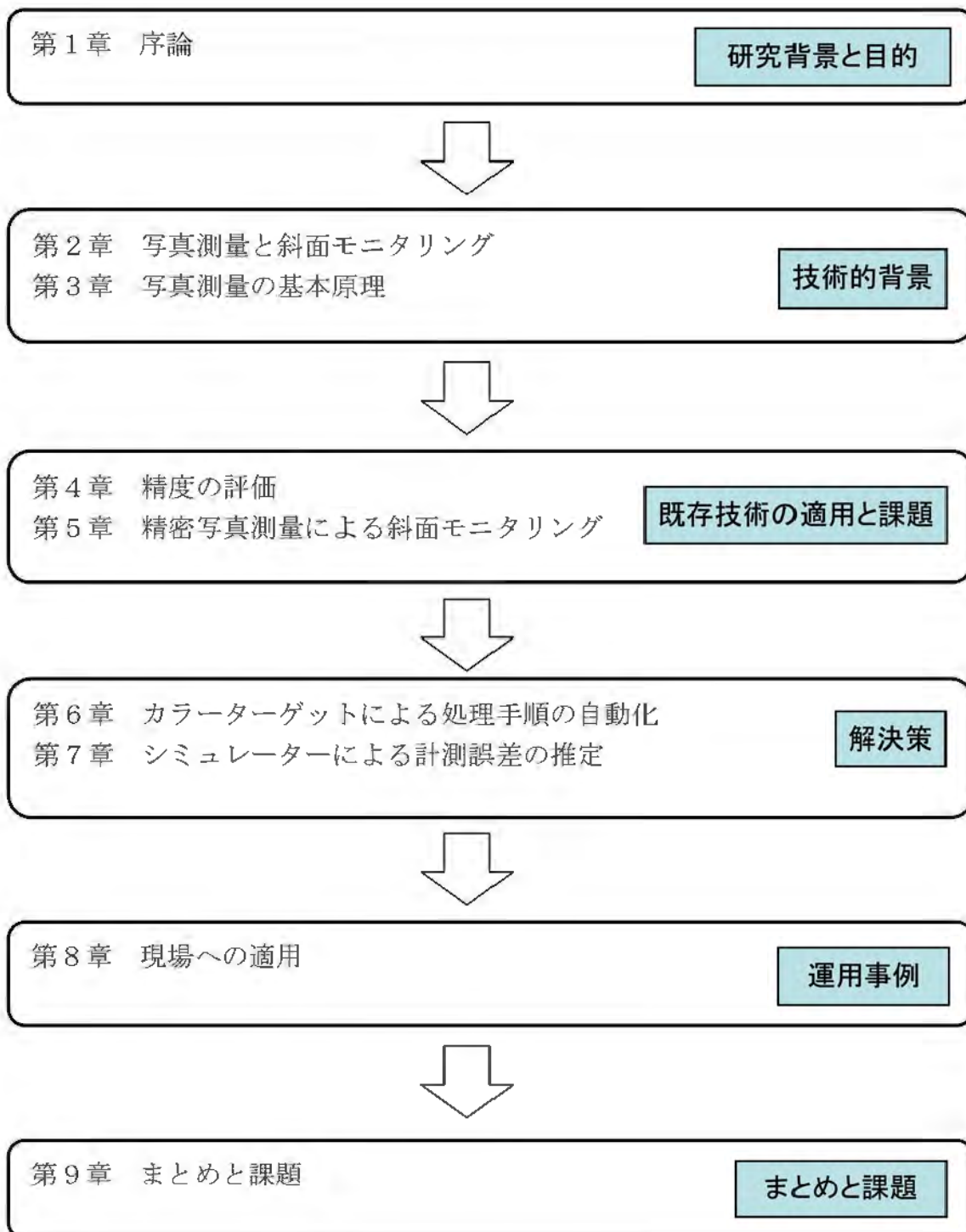


図 1.1 本論文の構成

1. 2. 論文構成

本論文は図 1.1 のフローチャートに示すように、のり面モニタリングの手法として適用するために、精密写真測量技術の基礎となる背景技術および数理的原理を確認し、これを基に構成された初期の基本的なシステムから、さらに作業効率を向上させるためのカラーターゲットによるターゲット位置自動推定機能についてその原理と手法を示し、異なる環境下でどのように撮影すれば要求精度を満たすことができるかを推定して実際の計測結果の適否を判定する根拠を提供するシミュレーションによる事前精度推定方法について示した。

さらに、今日までに達成されている一連の手法を適用した高速道路のり面におけるモニタリング手法を示し今後の課題についてまとめたものである。

以下に、本章以降の各章の概要を記す。

第2章では、写真・航空機・計算機の開発の概略的な歴史とそれらの複合応用技術である航空写真測量技術についての概要、現行の精密写真測量法を用いた上木分野における計測手順の概要について示した。また、斜面モニタリングの目的と計測方法、および現状の斜面モニタリング業務について旧日本道路公団の管理基準値を例示し、航空写真測量技術の発展形である近接写真測量技術（精密写真測量技術）と本論文の主題である斜面モニタリングへの適用についての概要を示した。

第3章では、解析写真測量の数理的原理について示した。対象点を多数の異なる位置から撮影することで、個々の対象点は複数の写真に写る。複数の写真について特定の点がどの位置に写っているかを調べれば、共線条件により、その点の三次元座標を算出することができることを確認した。

第4章では、精密写真測量にて使用している複数の精度に関する定義を再確認するとともに、実際に施工現場で行った光波測量、鋼巻尺との計測結果の比較をおこなった。また、模擬現場（テストフィールド）、実際ののり面での計測結果をもとに精度判定の基準となる指標について示した。

第5章では、第3章にて示した精密写真測量（解析写真測量）の手法を、実際に高速道路におけるのり面計測と管理に適用するための管理基準例を示し、実際の施工現場における計測結果例を示すことで、のり面計測における精密写真測量の実施状況およびデータのまとめ方を確認し、その際に発生する課題および問題点について示した。

第6章では、前章で確認された課題を解決するために、撮影した写真毎に行うターゲットのナンバーリング作業を自動化するための手法を検討し、ひとつの解決策としてカラーターゲットを用いての、処理を自動化する手順を示した。

従来は、各画像について人手作業を主体に、4点から5点のターゲットをマーキングし、この結果から後方交会法によりカメラ位置を特定して、この情報を元に他のターゲット位置を推定していた。本手法では、各写真のターゲットを人手作業でマーキングする代替としてカラーターゲットの色情報を初回に設定すれば1回の計測で撮影したすべての写真について、上記作業を自動化できることが確認できた。また、自動認識が不調であってもいくつかのカラーターゲットについては抽出できていることから、マーキング作業の補助機能としても利用が可能であり、従来の作業よりは作業時間を短縮させることが可能なことを確認した。

第7章では、第5章で課題とした、計画段階における精密写真測定の解析計算結果の精度を推定するためのツールとして、解析シミュレーション機能について示し、それによる精度の推定と推定結果の対比を行った。また、定性的な要素であった精度の標準式におけるネットワーク強度について、定量的な推定をすることが可能であることを示した。

第8章では、カラーターゲットによる処理の効率化（第6章）およびシミュレーションによる事前の精度推定と撮影位置の決定（第7章）に基づき、実際の現場で実施・運用を行った適用事例および管理方法の実例を示した。

第9章では、本研究結果のまとめと今後の課題について示した。

参考文献

- (1) 龍明治, 2008, 地盤・岩盤斜面動態観測のためのデジタル画像計測手法に関する研究, 京都大学大学院博士論文
- (2) 三浦悟, 2005, 土木計測分野におけるデジタル写真測量の高度化に関する研究, 京都大学大学院博士論文

第2章 写真測量と斜面モニタリング

2. 1. 概説

本章では、写真・航空機・計算機の開発の歴史と、それらの複合テクノロジーである航空写真測量技術についての概要を示したあと、これらの発展形である近接写真測量技術（精密写真測量技術）と本論文の主題である斜面モニタリングへの適用についての概論およびその他斜面モニタリング技術について示す。

2. 2. 写真・航空機・計算機

Toni Schenk は著書 Digital Photogrammetry Volume I の序文の最初に、写真測量と猫は9つの魂がある (Photogrammetry has nine lives) と記している。これはいささか誇張であろうが、近年のデジタルカメラの高精細度は、写真測量に新たな魂を吹き込んだという点において異論はない。⁽²⁾

そもそも写真と航空機との結びつきは非常に古くからあり、それぞれの技術の黎明期において既に融合しようという試みが多数なされていた。また、近年のコンピュータテクノロジーは、今まで「理論的には可能であるが実現は不可能」とされてきた解析計算をパーソナルコンピュータ上で実現できるまでになっている。

図 2.1 に写真測量関連技術の年表を示す。

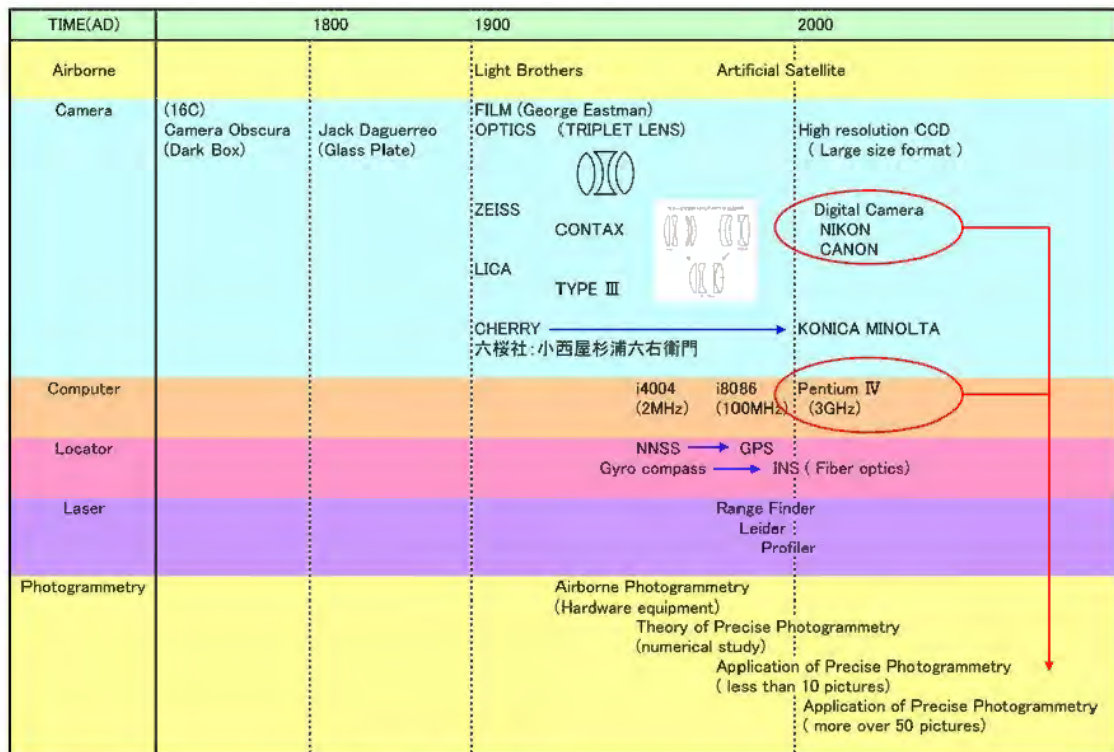


図 2.1 写真測量関連技術の年表

写真機の原型とも言われる Camera Obscura は、もともと画家のスケッチを簡便に、さらに精細に行うための暗箱であった。ピンホールを空けただけの暗箱内に外部の風景が投影された状態で、それを紙に写し取っていたのである。その後、銀塩化合物による感光材料が発明され、写真乾板からフィルムベースを経て、写真技術の集大成ともよべるカラーフィルムが世界中に行き渡っていくのである。

また、ライト兄弟が航空機で初めて空を飛んでから数年後にはカメラを航空機に搭載して地上を撮影する試みがなされたという話を学生時代に測量学の講義で聴いた記憶があるが、George Eastman がフィルムを発明し、KODAK 社を設立した時点でのフィルム感度では、大した写真は取れなかったのではなかったかと思われる。しかし、これら先人たちの努力は、時に戦争の偵察機材として、時に行方不明者の搜索に、時に地図作成にと航空写真のもつ大きな可能性を切り開いていった。

写真測量に携わる人間にカメラで何が計測できるのか？という問いを発すれば、カメラはレンズ主軸に対して無数の点の相対角度を計測できる、非常に優れた測角儀であるという答えが帰ってくるだろう。被写体から発せられたレンズ中心を通る光は、すべて感光面に結像する。すなわち、レンズの焦点距離が既知であれば、写真中心とその他の部分の点の距離はそのまま角度を表しているのである。この原理が共線条件式を生み出し、複数の視差のある画像を元に 3 次元計測へと技術展開していったのである。

このようにして、航空機搭載カメラによる 3 次元計測の技術は、主にカメラの性能の向上とともに急速な進歩を遂げ、現在では地形図作成に不可欠な技術となり、航空写真測量という呼称は、広く一般的なものとなった。さらに、従来では高精度に調整されたレンズと大きなフィルムサイズ（高解像度）の航空写真用カメラでなければ写真測量による結果は惨憺たるものであったものが、今日ではカメラ量販店で誰もが容易に購入できる民生用カメラで 1 千万画素以上ものが入手可能となり、後述するセルフキャリブレーション付バンドル調整計算を使用してレンズ歪みを解消することで、航空写真用カメラ並みの高精度の結果を得ることができるようになった。

これら科学技術の進歩により、航空機搭載カメラでなければ出来なかった高精度の 3 次元計測が、ハンディの一眼レフカメラで実現することができるということは、航空機とカメラを切り離して実施することが可能となったこと意味

する。つまり「航空機写真測量」は、「写真測量」として地上において実施可能な、非常に古いが全く新しい計測技術となって、現在われわれの手元にある。⁽¹⁾

土木の分野に於いても、この技術（精密写真測量技術と呼ばれる）をのり面や岩盤斜面のモニタリングに適用しようという研究は数多くなされており⁽⁸⁾⁽⁹⁾、高速道路の斜面モニタリングの汎用的な計測手法として積極的に利用しようという研究が、高速道路総合技術研究所（旧日本道路公団中央研究所）を中心に行われている。

2. 3. ステレオ航空写真による地形計測



図 2.2 中越地震(2004)後の山古志村付近ステレオ写真
(アジア航測ホームページより)

上図は、航空機から撮影された2枚のステレオペア写真である。実体視により写真の中央部分が大きく陥没し、下側で盛り上がっていることが観察できると思う。このように、2枚の撮影位置の異なる画像（ステレオペアと呼ぶ）を組み合わせると、その視差により肉眼で見ると立体図形となる。⁽⁷⁾

また、反射式実体鏡（図 2.3）を用いるとより広範囲のステレオペア写真についてその状況を観察することが出来るとともに、視差差測定棒とよばれる器具を用いて観察すると、撮影位置からの距離差分（垂直写真の場合には高度差分）を計測することが出来る。



図 2.3 反射式実体鏡（関西地図センターホームページ）

このようにして、3次元空間を2次元平面に投影した結果である写真を複数枚、組み合わせることで仮想的な立体像を生成し、計測する技術を写真測量と呼ぶ。ただし、写真2枚の組合せではいずれの画像でも隠蔽されてしまう部分（見えない部分）が多数出現する可能性があるため、通常は3枚の画像から地図作成を行う。これをトリプレット画像と呼ぶ。⁽¹⁾

この写真測量の技術は、人の入れない山中や未開拓地域の地図作成に広く利用され、機械的にステレオペア写真から地形図を作製する解析図化機の発明により、写真・航空機の組合せは地図作成に必要不可欠なものとなっている。さらに近年では、デジタル技術の発展に伴い、すべての撮影した画像をデジタル化し、機械式の解析図化機の動作をプログラミングしたアプリケーションにより、モニター画面上で地図作成のすべての処理を行えるデジタル図化機も登場している。デジタル技術の進歩は、写真測量における数理解析計算についても大きな進化をもたらした。メモリ容量の増大、CPU処理速度の高速化により、一度に多数のデータを処理できるようになったため、後述する古典的な共線条件式から、10年から20年前には大型計算機でなければ実行できなかった、高精度の3次元座標推定計算がパーソナルコンピュータで実行可能になった。

次に、このステレオペア画像を用いた立体写真測量の概要について示す。

2. 4. 立体写真測量

図 2.4 は、立体写真測量の原理を示したものである。立体写真測量では二枚以上の写真の投影中心を通る光束が互いに交わる前方交会の結果として、対象物の三次元座標が求められる。すべての写真が、撮影されたときの状態に再現されるとすなわち、写真の外部標定が完了すると、二枚以上の対応する写真の像と投影中心を通る光束は、実空間でことごとく交会し、立体像が得られる。この立体像は写真測量ではモデルと呼ばれる。⁽³⁾

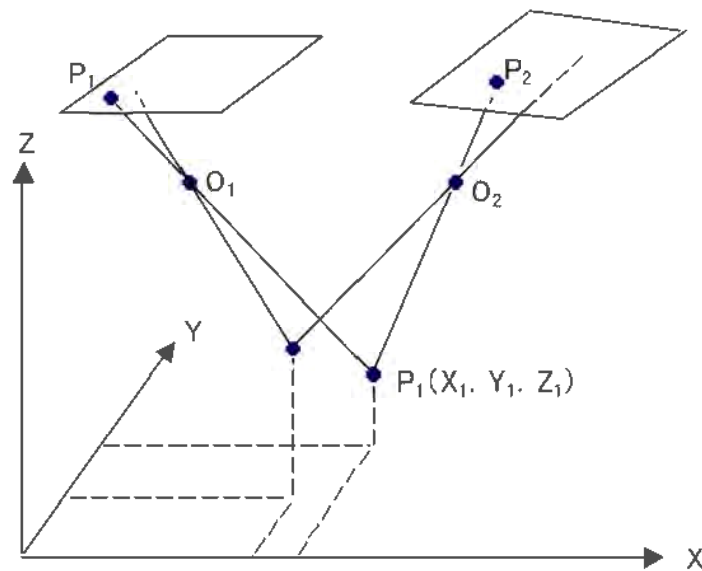


図 2.4 立体写真測量の原理

モデルの形成は、写真が撮影された状態の空間位置に厳密に等しくなくても撮影されたときの写真の位置および傾きの関係が相対的に同じであればよい。

このような相対的なモデルをつくることを、写真測量では**相対標定**と呼んでいる。しかし、最終的には対象物が定義されている三次元座標でのモデルが必要となるから、**相対評定**で得られたモデルを、さらに最終的に必要な座標系に変換する。この座標変換を**絶対標定**という。

このように、2枚以上の画像から3次元座標を求めていくのが写真測量の基本である。

後述するバンドル調整計算を用いれば、多数の写真から同様な計算をすることができるため、2～3枚の画像で計測した結果に比べて、はるかに高精度の計測を実施することが可能である。

2. 5. フリーネット解法と変移量計測

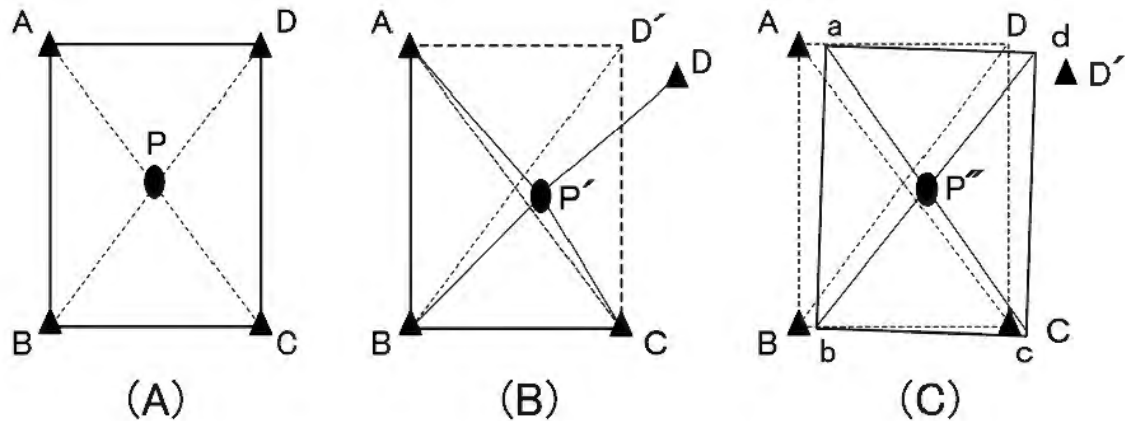


図 2.5 フリーネット解析の概念図

固定された点を設定せずに計画行列（観測方程式）を解く方法をフリーネット解法またはフリーネットワーク解法という。それぞれの対象点が固定されていないと考え、それぞれの距離の誤差を均等に配分して形の歪を最小にしようとする解法である。図 2.5 にフリーネットの概念図を示す。

図 (A) では、A, B, C, D はターゲットを表しており、一つの平面を作るネットワークで構成されている。P は四角形 ABCD の重心を示す。ここで、A, B, C, D それぞれが誤差を持っているとした場合、図 (B) では、仮に A, B, C を固定すると、誤差が D にのみ集まることになる。しかし、図 (C) に示すとおり ABCD の各点について、いずれも位置を固定せずに、A, B, C, D に誤差を均等に配分し、四角形 a b c d を計算した場合、前提の計上は図 (A) 図形と比較して位置が微妙に変化するが、その形状については、ほぼ一致している。

もともと、斜面モニタリングでは変位計測を目標としているため、重要なのはターゲット相互間の変化であり、絶対座標点からの変化ではない。そのため、フリーネット解法の考え方は上記目標を達成するための解法と適合していると言えることが出来る。

2. 6. 土木分野で実施する精密写真測量の手順

図 2.6 に土木分野における精密写真測量の手順を示す。

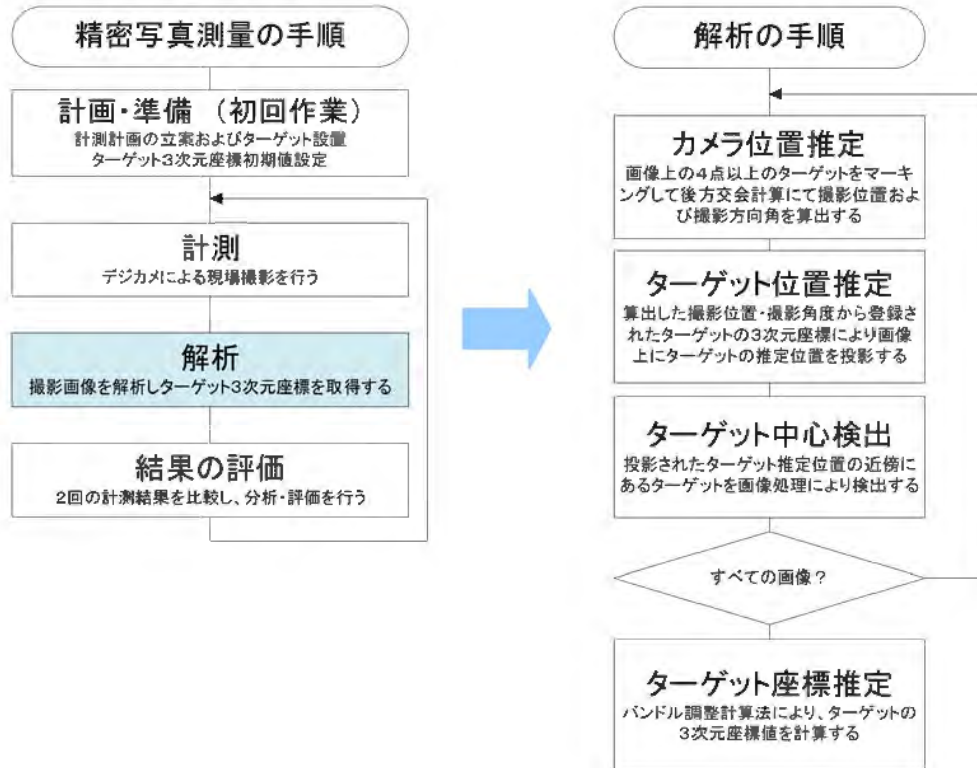


図 2.6 精密写真測量の手順

図 2.6 に示す通り、精密写真測量による計測では事前に計測計画を作成してターゲットを現地に設置しておく必要がある。計測における現場作業は、計測計画のとおり現場でデジタルカメラによりターゲットを撮影することだけである。撮影後は室内作業として、撮影画像毎にそれぞれの画像上で確認できる登録したターゲットの ID および画面中心点を $(0, 0)$ としたターゲット中心の画像座標 (xy) 、個々の画像のカメラ撮影位置、カメラ撮影方向（両者を合わせて外部標定要素と呼ぶ）を取得する。

精密写真測量においては、このターゲット中心座標とカメラの外部標定要素が観測値となる。の観測値を用いて第 3 章に示すバンドル調整計算を実施してターゲットの 3 次元座標値を取得する。

この観測値を取得するため、作業者は以下のような手順を全撮影画像に対して実行する。

【カメラ位置推定】

- ・ 画像上のターゲット 4～5 点について、ID と中心座標を求める。この際、選択するターゲットはなるべく画像全体から離散的に選択する。尚、ターゲット中心座標の検出については、図 2.8 に示す通りターゲット画像が周囲に比較して明度が高いことを利用して、特定の明度以上の領域を切り出し、明度の重みをつけて重心計算を実施し、重心位置を画像上の中心座標としている。

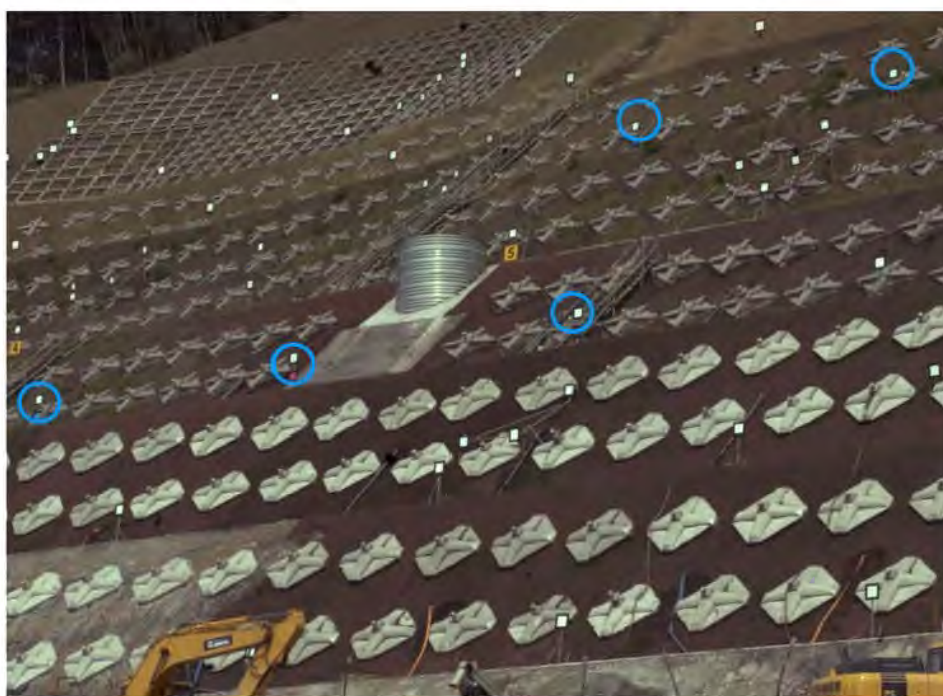


図 2.7 ターゲットのマーキング

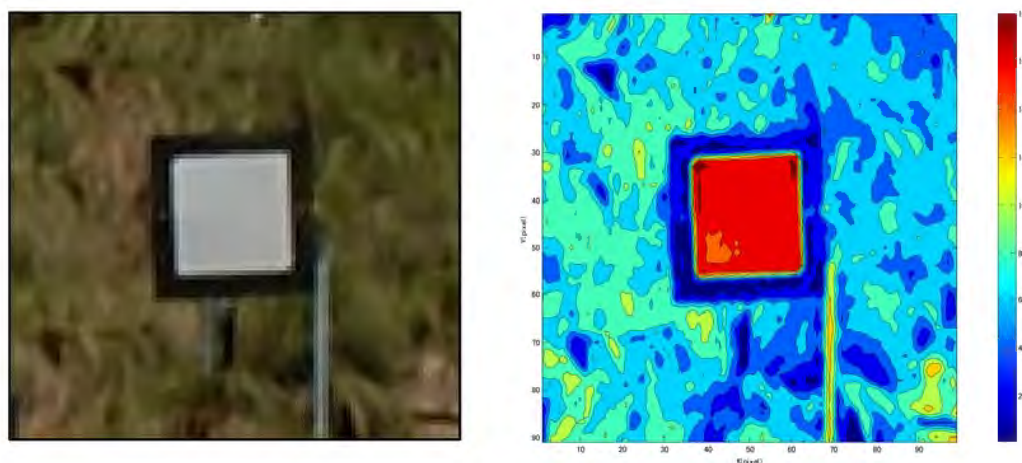


図 2.8 ターゲット中心座標の検出

- ・上で求めたターゲットの ID および中心座標から、後方交会法（図 2.9）によりカメラの外部標定要素を計算する（事前に撮影位置、撮影方向のそれぞれに概略初期値の設定が必要である）

後方交会法は、ターゲット本来の位置（P）、ターゲットの画像上（p）での位置、カメラ中心点（C）は直線上にあるという条件（共線条件）を用いて、ターゲットの 3 次元座標およびターゲットの画像座標からカメラの外部標定要素を求める手法である。（詳細については第 3 章に記載する）

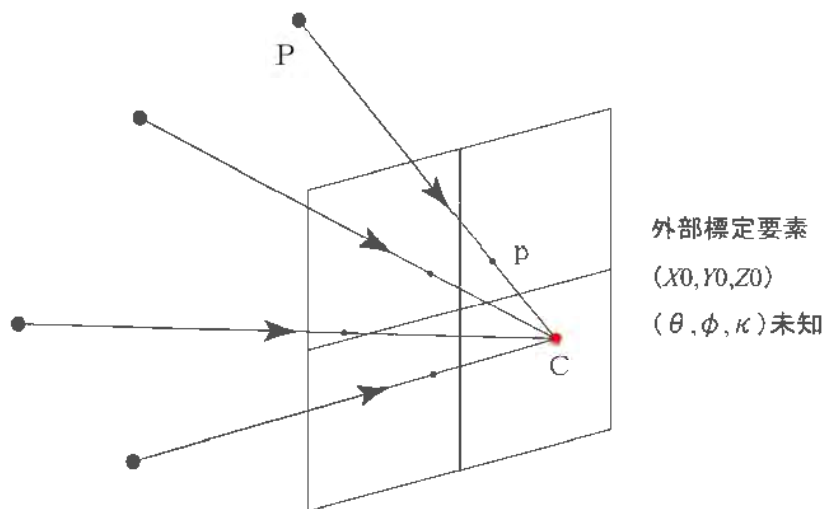


図 2.9 後方交会法のイメージ

【ターゲット位置推定】

- ・計算により求めた、外部標定要素より、あらかじめ初期値として登録しておいたターゲット 3 次元座標を用いて、撮像面（CCD 面）への投影計算処理を行い、画像上の 2 次元座標値に変換する

これは、上記に示した後方交会法の計算手順の逆計算により実施することができる。（P および C より p を求める手順を実行する）

本処理は、計測アプリケーション内で自動的に実行される。

【ターゲット中心検出】

- ・変換したターゲットの推定中心位置を撮影画像にオーバーラップして画面上に表示する



図 2.10 ターゲット推定中心の表示

- ・表示されたターゲットの推定中心位置と実際のターゲットの中心がずれていれば、画像処理により推定中心位置の近傍でターゲットの中心探索を行う（例：図 2.10 の「A」のターゲット）

写真枚数およびターゲットの点数が少ない場合には、この処理に要する時間は全体の処理時間の中で大きな比率とはならないが、計測精度を向上させるために写真枚数やターゲットの点数を増やすことで作業時間が増大する他、ターゲット点数が増加することにより人為的なターゲットのナンバリングミスが発生しやすくなり、作業の手戻りが大きな時間ロスとなる。

精度・写真枚数・ターゲット数の関係については第 4 章で詳細を示すが、これが、第 1 章で示した問題点の一つであり、土木分野での精密写真測量導入への否定的な要素となっている。

2. 7. 斜面モニタリングの目的と手法

重力によって直接起こる岩石や碎屑物質(土壌・岩屑など)の斜面下方への移動はマスマーブメント(mass movement, mass wasting)と呼ばれ、その運動様式によって次のように分けられる。⁽⁵⁾

- ・ 匍行(landcreep)…動きが緩慢で運動領域と不動領域の境が不明瞭なもの
- ・ 滑動(landslide)…動きが急速で運動領域と不動領域の境が明瞭なもの
- ・ 流動(flow)…水を多量に含む急速混濁乱流
- ・ 崩落(fall)…粉体移動ないし個体落下

土砂災害はこれらの運動様式の単独または複合的な発生によりもたらされるものであり、一般的には次のように分類される。

- ・ 地すべり…特定の地質のところで発生する、土塊はマスとして移動、大規模、動きは比較的緩慢であり、周期性・継続性がある、緩斜面で発生
- ・ 崩壊(山崩れ・崖崩れ)…地質との相関は薄い、原形を留めず、動きは急速である、急斜面で発生
- ・ 大規模崩壊(地すべり性大規模崩壊)…規模・運動様式共前2者の中間、平常はクリープし限界に達すると大規模に急激な崩壊を起こす
- ・ 土石流…豪雨時に溪流に沿って土石が急激に流下する現象、斜面崩壊が引き金になることが多い

斜面モニタリングは、これらの土砂災害の予兆を検出して緊急または恒久的な対策施工を行ったり、緊急時の通行止めや避難警告を発したりすることが目的であり、精度の良い斜面モニタリングを行うことにより人的・社会的な被害を未然に防止し低減させようとするものである。

上記の災害のうち、土石流については突発的に発生するものがほとんどであり、予兆を検知することは困難である。地すべりについては、運動様式が比較的ゆるやかであり、発生しやすい地形・地質構造もある程度限定されているため、航空写真調査や古文書による文献調査等でもおよそその危険地域を特定することができる。このため、地すべり地域については事前にモニタリング対象として選定することが可能である。ただし、道路のり面については山間部を開削して人工的に造成されるケースが多く、それまでは安定していた斜面が施工中または施工後に地すべり危険斜面となりうる可能性がある。

崩壊については、運動様式が急速であり、急斜面で発生することから近距離での目視による観察や、機器の設置が困難である場合が多く、ある程度距離の離れた場所からの非接触計測によるモニタリングが主体となっている。

斜面モニタリングは大きく分けて巡回目視点検と計測機器によるモニタリングがある。巡回目視点検では、聞き取り調査の実施、構造物・道路等のひび割れやゆがみ・ずれといった変形の視認、傾斜の変化、排水孔の水量等の変化の確認により変状を検知する。また、計測機器によるモニタリングでは、特定の変位を計測する装置を現場に設置して、直接またはリモートによりデータを収集してモニタリングを行う。

図 2.11 は代表的な斜面モニタリングに用いる機材を図にしたものである。以下に精密写真測量以外の斜面モニタリング手法について示す。

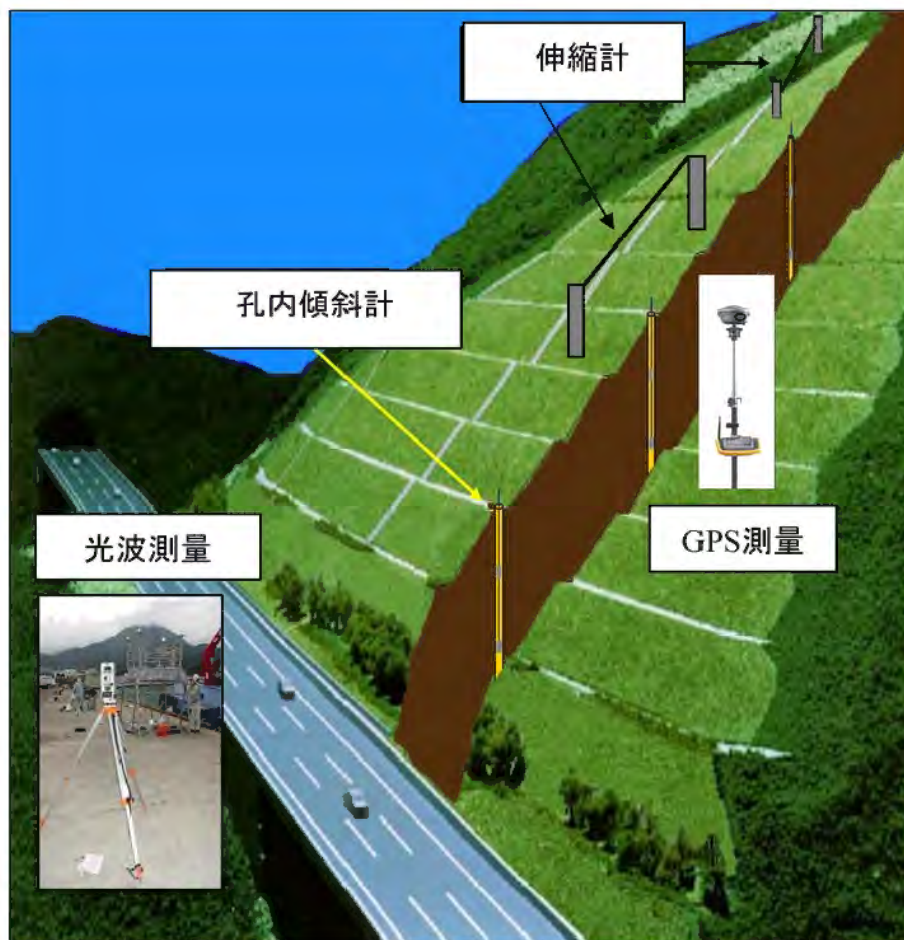


図 2.11 代表的な斜面計測手法

2. 7. 1. 孔内傾斜計

孔内傾斜計は、ボーリング孔に連続的に傾斜計を埋め込み、地表面からの距離に応じた、地中の変位（ボーリング孔の傾斜変位）を計測するものである。

傾斜計の感度はかなり高いため微小な変位でも比較的精度良く計測できる。

地すべり等、ゆっくりとした変動を計測するのに向いているが、コスト的に高いため斜面の変位が発生しているまたは過去に発生した事例があるといった場合のみ利用されるケースが多い。また、点の計測なので斜面全体の変位を計測使用とする場合、多くのボーリング孔と傾斜計が必要となる。

さらに、ボーリング孔の変形が進行してしまうと抜き出すことができず、現場に埋め棄てになってしまう場合があり、さらに斜面が大変形した場合には傾斜計が破損してしまうこともある。

2. 7. 2. 伸縮計

伸縮計は、固定された2点にワイヤーを張ってその2点間の距離の移動を計測するものである。最近では光ファイバーを貼っておいて張力の変化による信号の伝達速度の変化から微小なひずみ量を計測できるものもある。

欠点としては、①物理的な長さの測定になるため限界長が存在し、ある程度の変位を超えてしまうと計測できない、②破断する可能性があり、破断してしまうと計測ができない、といった点がある。

2. 7. 3. GPS測量

GPS (Global Positioning System) は、アメリカ合衆国国防総省管理の27衛星のうち、複数の衛星からの時刻電波信号を受信し、その受信時の位相差および衛星軌道位置から自己位置を3点測量により算出するシステムである。民間で利用できるようになったのは1993年からで比較的新しい技術である。(それ以前にはアメリカ海軍のNNSS (Navy Navigation Satellite System) が存在したが位置決定精度が100m程度と荒かったため船舶の自己位置検出以外にはあまり利用されていなかった) 基本的には単体で数メートルの誤差を持っているが、基準局と呼ばれる固定点の情報とリンクさせることで誤差成分を除外することが可能であり、測量用では誤差数ミリメートルのものもある。斜面の計測にはGPS受信機を固定して、定期的に計測データを収集する。

このGPSの計測データを、インターネットを利用しリモートで集計分析を実施するサービスが、国際航業㈱の斜面ネットである。(図 2.12) 施工現場に、必要とするポイント数のGPS受信機を設置し、無人運転で24時間データの収集を実施し、契約ユーザーが設定した管理基準値を超えると登録した携帯電話等にメールで警告を送信する。また、雨量計とのリンクも可能で、契約ユーザーは現場での降雨状況とGPS測量による変移量を24時間、インターネット上から確認することができる。⁽⁶⁾



図 2.12 Shamen-net.com サンプル画像
(Shamen-net.com ホームページより)

2. 7. 4. 光波測量

光波測量は、トータルステーションと呼ばれるセオドライトと光波測距儀を組み合わせた測量機器を用いて、予めセットしておいたターゲットまでの距離、方向角、上下角を計測するものである。距離をレーザー光の反射により計測するため、光波測量と呼ばれている。基本的には、座標既知の点から測量して機器の設置されている位置（自己位置）を求めた上で、ターゲットを計測する必要があるため、手間がかかる。また、多数の点を一度に計測できないという制約がある。しかし、精度は100mの距離で数ミリメートルと高い水準の計測器であり、土木現場にはほとんどの場合、測量技術者が駐在しているため機器の扱いに慣れているため、それほど手間ではないという意見もある。

しかし、施工が完了し、供用後にモニタリング計測を実施する場合には測量技術者でないことがほとんどであるため、逆に作業習熟に時間がかかるケースもある。また、計器を固定させる必要があるため移動体上からの計測、湖面上からボート等による計測は不可能である。

2. 8. 道路のり面の管理基準

これまで、斜面モニタリングの手法について、それぞれの特徴等について示してきたが、本節では実際に斜面モニタリングを実施するために、現場ではどのような方法と基準により管理しているかを示す。

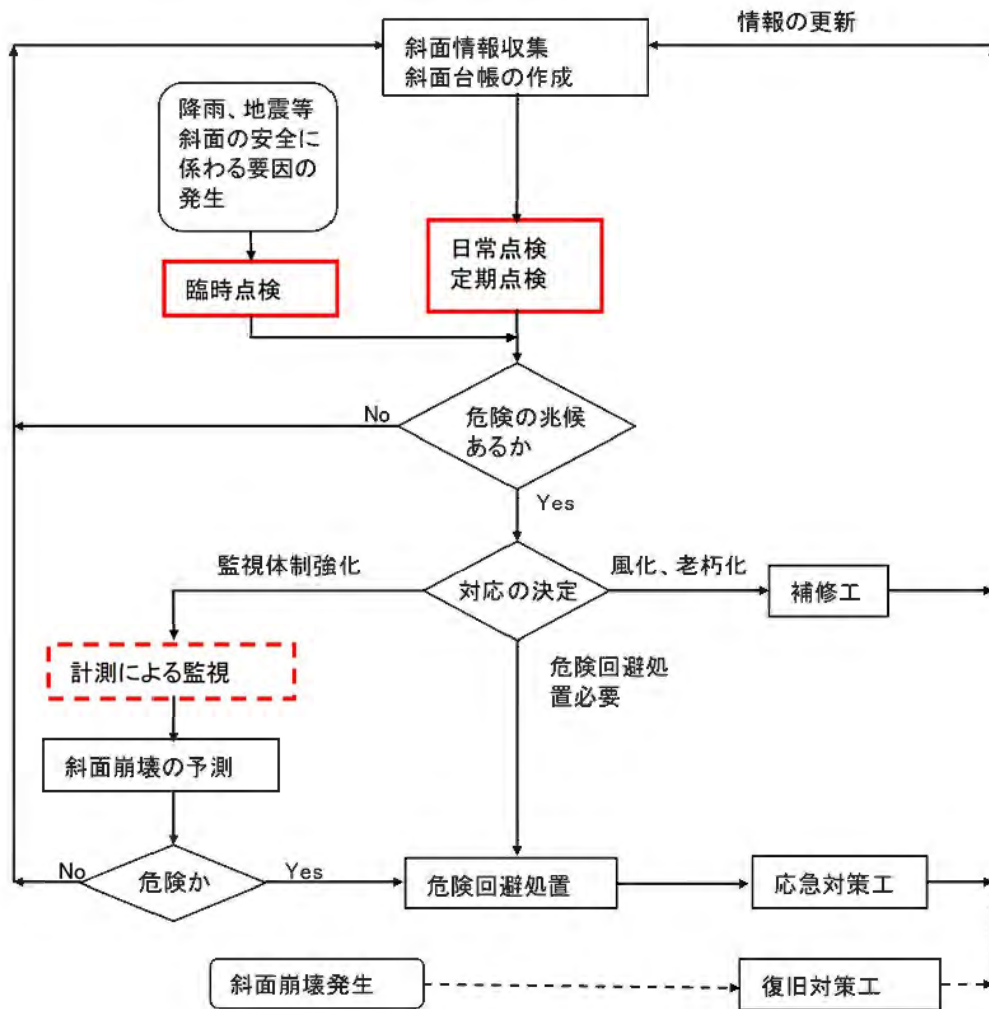


図 2.13 代表的な斜面モニタリングの流れ

図 2.13 に代表的な斜面管理業務の流れを示す。図中に赤枠で示した部分が実際に現場に於いて実施する点検監視業務を示している。定期的な点検と安全にかかわるインシデントが発生した場合の緊急点検、また危険の予兆が確認された場合の強化監視（複数の計測手段の採用等）によりその都度対応を決定し、危険を予防し回避することを目的としている。

この点検・監視作業においては、その結果を客観的に評価できるよう、管理基準値を設定している。表 2.1 は旧日本道路公団の土質地質調査要領に規定す

る「変位速度（変位量）」による管理基準値である。この管理基準値が、のり面の管理基準値として示されている旧日本道路公団唯一の基準値であり、建設工事段階と維持管理段階の規定の２種がある。⁽¹⁰⁾

施工段階での管理基準値と地表に現れる地すべり現象

計測機器	管理基準値 の表記法	対 応 区 分			
		点検・要注意 または 観測強化	対策の検討	警戒・応急 対策	嚴重警戒・ 一次退避
伸 縮 計	継続日数とその間の変位速度	5mm以上	5～50mm	10～100mm	100mm以上
地中伸縮計		/10日	/5日	/1日	/1日
光波測距儀					

「土質・地質調査要領」（日本道路公団 平成4年4月）より抜粋

維持管理段階での管理基準値と地表に現れる地すべり現象

計測機器	管理基準値 の表記法	対 応 区 分			
		点検・要注意 または 観測強化	対策の検討	警戒・応急 対策通行止めの検討	嚴重警戒・ 通行止め
伸 縮 計	継続日数とその間の変位速度	10mm以上	5～50mm	10～100mm	100mm以上
地中伸縮計		/30日	/6日	/1日	/1日
光波測距儀					

「土質・地質調査要領」（日本道路公団 平成4年4月）より抜粋

表 2.1 道路のり面の管理基準

この管理基準値は、変位量と時間の関係、すなわち変位速度からのり面の安全管理を実施しようとするものであり、計測の手段として、伸縮計、地中伸縮計または光波測距儀を用いて２点間の距離を計測し、その変位を求めることを想定している。先に示したように、精密写真測量技術を適用すれば２点間の相対距離変化を計測することが可能であり、計測手法を手順化することにより、斜面モニタリングにおいて表 2.1 の要求精度を十分に満たすことが可能である。

参考文献

- (1) 日本写真測量学会誌, 1988, 写真測量の歴史, 社団法人日本写真測量学会
- (2) 村井俊治, 近津博文監訳, 2002, デジタル写真測量, (社)日本測量協会,
(Toni Schenk: Digital Photogrammetry Volume I)
- (3) 村井俊治, 1983, 解析写真測量, 社団法人日本写真測量学会
- (4) 武田裕幸, 今村遼平, 1996, 応用地学ノート, 共立出版
- (5) 岩松暉, 2000, 地すべり学入門, 鹿児島大学理学部地学科応用地質学
講座ホームページ
- (6) 国際航業㈱ホームページ
- (7) アジア航測㈱ホームページ
- (8) 龍明治, 2008, 地盤・岩盤斜面動態観測のためのデジタル画像計測手法に
関する研究, 京都大学大学院博士論文
- (9) 三浦悟, 2005, 土木計測分野におけるデジタル写真測量の高度化に関する
研究, 京都大学大学院博士論文
- (10) 日本道路公団, 1992, 土質・地質調査要領

第3章 写真測量の基本原則

3. 1. 概説

本章では、写真測量の数理的原理について示す。

対象点を撮影することは、空間座標を 2 次元の局所座標に変換する作業である。レンズを通して撮影される空間上の 1 点は、写真上でも唯一の点となる。(共線条件) 対象点を異なる 2 地点以上の点から撮影する。撮影したそれぞれの写真(画像)について、レンズの焦点距離、レンズの光軸の方向および特定の点が写真上のどこに写っているかを調べ数値化する(共線条件式を作る)ことで、対象点の三次元座標を逆算して求めることができる。この共線条件式から対象点の三次元座標を逆算して求める手法を**解析写真測量**と呼ぶ。⁽¹⁾

3. 2. 共線条件

図 3.1 は理想的なレンズによる光学系を示したものである。理想的なレンズでは、レンズの光学的性質を代表する 2 つの不動点 S および S' が存在する。この 2 つの点は次のような特別な性質を持っている。すなわち、**実空間**(カメラの外側の空間、カメラの内部の空間を**像空間**という)の任意な点 P から出た光は必ず、点 S 、 S' を通り、点 P' に像を結ぶ。また、 P と S 、 S' と P' を結ぶ 2 つの直線は、平行となる。仮に、 S と S' を一致させたとすると(このような点を、**投影中心**という。)点 P 、点 S および S' 、点 P' は、同一直線上になければならない。このような条件は総称して**共線条件**と呼ばれる。共線条件は、解析写真測量のよりどころとしている唯一の基本的条件であり、他の条件も共線条件の組合せによって導かれる。

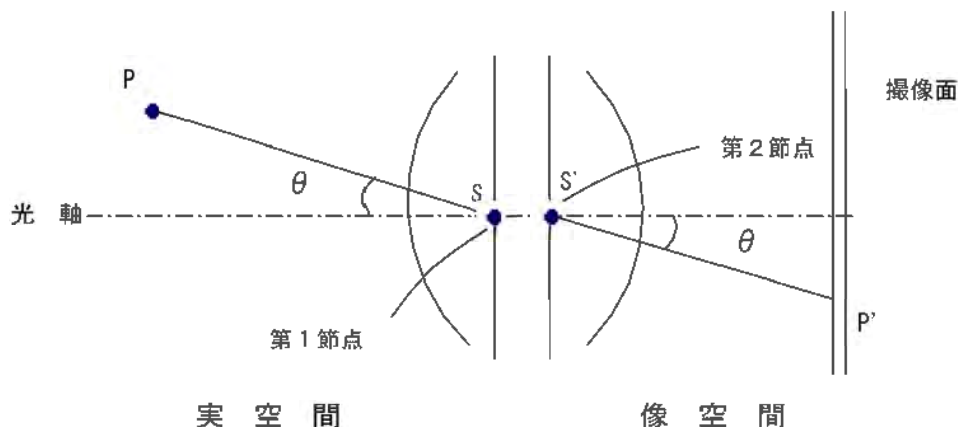


図 3.1 理想的なレンズ

3. 3. 共線条件式

右図は、3次元空間座標系とカメラの撮像面の座標を示したものである。対象空間座標系は XYZ で、カメラ座標系は xyz で表される。 P は撮影する対象点、 p はその撮像面上での像、 C はカメラ座標の原点（レンズ中心）である。また、レンズ中心から撮像面までの距離を f とする。（レンズ焦点距離）それぞれの点の位置ベクトルを次のように定義する。ただし、 p はふたつの座標系で定義しておく。

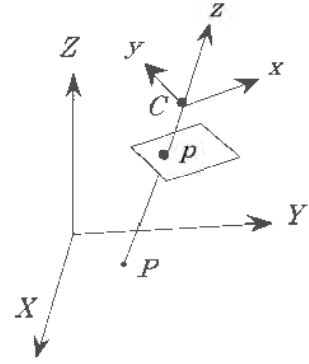


図 3.2 座標定義

$$P : X = [X \ Y \ Z]^T \quad XYZ \text{ 系での座標}$$

$$p : x = [x \ y \ -f]^T \quad xyz \text{ 系での座標}$$

$$X_1 = [X_1 \ Y_1 \ Z_1]^T \quad XYZ \text{ 系での座標}$$

$$C : X_0 = [X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T \quad XYZ \text{ 系での座標}$$

この3点は直線上にあるから、ベクトル Cp とベクトル CP はスカラー倍の関係にあり

$$\lambda (X - X_0) = X_1 - X_0 \quad (3.1)$$

と書くことができる。（ λ は定数）

また $X_1 - X_0$ はカメラ座標系での x に他ならないから座標の回転行列を M とすると

$$x = M(X_1 - X_0) \quad (3.2)$$

と書ける。（3.1）（3.2）より

$$x = \lambda M(X - X_0) \quad (3.3)$$

これが共線方程式であり、解析写真測量におけるすべての計算の基礎になるものである。

以下に行列式を展開し一般化した共線条件式を導く。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

上式の ω 、 ϕ 、 κ はそれぞれ座標軸の回転量をあらわしている。通常、撮影軸（レンズ光軸）に対しての回転角をローリング（ ω ）、撮影軸の垂直方向の回転角をピッチング（ ϕ ）、水平方向の回転角をヨーイング（ κ ）と呼び表す。

各回転軸まわりの回転のイメージを図 3.3 に示す。

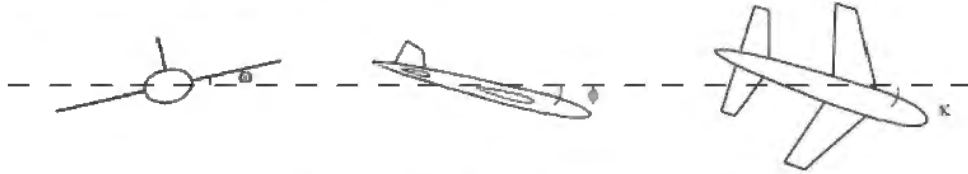


図 3.3 回転軸と角度設定の概念

なお、(3.4)式において、回転部分の積を要素として m_{ij} の形式で表記すると、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

となり、分解して λ を消去すると、

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

という、写真測量の教科書に必ず出てくる一般式の形に導くことができる。⁽²⁾

式(3.6)において既知数は撮像面上での2次元座標 (x, y) 、レンズ焦点距離 (f) の3個であり、未知数は対象点座標 (X, Y, Z) 、カメラ原点位置 (X_0, Y_0, Z_0) 、および m_{ij} の中に含まれるカメラ回転角度 (ω, ϕ, κ) の計9個である。

3. 4. 共線方程式の線形化

複数のターゲットを複数の位置から撮影した場合、多数の画像ターゲット座標値(x, y)が得られる。それぞれの座標値に対して(3.6)の1組の式を立てることができる。このようにして構成される多くの共線方程式を連立させて解けば、その解として対象点の3次元座標を求めることができる。

当然ながら未知数の数以上の式が立つだけの画像座標値が必要である。その解法は以下のとおりである。

- ①(3.6)は未知数について非線形なのでこれを初期値の回りでテーラー展開して線形化する。
- ②次に最小2乗法で解を求め、この解を用いて初期値を更新し、次の線形化の初期値とする。
- ③この手順を解が収束するまで繰り返す。

解法を説明する準備として、まず線形化の方法を説明する。一般的に非線形方程式 $f(x)=0$ を解くとき、初期値(仮の解) x_0 を設定してその回りで線形化し、得られた線形方程式を解いて Δx を得る。

そして $x_1=x_0+\Delta x$ として解を更新する。すなわち更新は前の値に修正項をたしあわせる。回転角度については3つの回転角度を個別に扱わず、回転行列として積の形で更新する。すなわち、初期回転行列を M_0 とし、線形化によって得られた更新分を ΔM とすると

$$M_1 = M_0 \cdot \Delta M \quad (3.7)$$

として次の回転行列を求める。このような形で線形化すると、係数行列に直交するベクトルが解析的に容易に作り出せる。

そこでまず線形化の準備として、回転角度の微小変化と回転行列の関係を明らかにしておく。

ω 、 ϕ 、 κ がそれぞれ $\Delta\omega$ 、 $\Delta\phi$ 、 $\Delta\kappa$ だけ微小変化したとき、

$\cos\Delta\omega \sim 1$ 、 $\cos\Delta\phi \sim 1$ 、 $\cos\Delta\kappa \sim 1$ であり、
 $\sin\Delta\omega \sim \Delta\omega$ 、 $\sin\Delta\phi \sim \Delta\phi$ 、 $\sin\Delta\kappa \sim \Delta\kappa$ であるから、

$$\Delta M = \begin{pmatrix} 1 & \Delta\omega & -\Delta\kappa \\ -\Delta\omega & 1 & \Delta\phi \\ \Delta\kappa & -\Delta\phi & 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

と書き表すことができる。これを用いると、微小回転による回転行列 M の変化分 dM は次のように計算できる。

$$dM = M \cdot \Delta M - M = M(\Delta M - I) \quad (3.9)$$

よって、 ω 、 ϕ 、 κ についてそれぞれ微分した係数は、

$$\frac{\partial M}{\partial \omega} = \begin{pmatrix} -m12 & m11 & 0 \\ -m22 & m21 & 0 \\ -m32 & m31 & 0 \end{pmatrix} \quad \frac{\partial M}{\partial \phi} = \begin{pmatrix} 0 & -m13 & m12 \\ 0 & -m23 & m22 \\ 0 & -m33 & m32 \end{pmatrix} \quad \frac{\partial M}{\partial \kappa} = \begin{pmatrix} m13 & 0 & -m11 \\ m23 & 0 & -m21 \\ m33 & 0 & -m31 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

となる。先に示した共線条件式(3.6)を変形し、

$$\begin{aligned} Fx &= x + f \frac{Nx}{D} = 0 \\ Fy &= y + f \frac{Ny}{D} = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

として、9つの未知パラメーターに関して(3.11)式を微分することによって次のような線形化された共線方程式を得る。

$$\begin{pmatrix} b11 & b12 & b13 & b14 & b15 & b16 \\ b21 & b22 & b23 & b24 & b25 & b26 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X0 \\ \Delta Y0 \\ \Delta Z0 \\ \Delta \kappa \\ \Delta \phi \\ \Delta \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -b11 & -b12 & -b13 \\ -b21 & -b22 & -b23 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ex \\ ey \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

これは一つの像について、対象空間点と、その写真面上の像と、レンズ中心が直線上に存在するという条件を表すものである。

ちなみに、係数 $b11 \sim b26$ は以下のとおりである。

$$b11 = \frac{f}{D^2} (-m11D + m31Nx)$$

$$b12 = \frac{f}{D^2} (m12D + m32Nx)$$

$$b13 = \frac{f}{D^2} (-m13D + m33Nx)$$

$$b14 = \frac{f}{D} \{ (X - X_0)m13 - (Z - Z_0)m11 \} - \frac{fNx}{D^2} \{ (X - X_0)m33 - (Z - Z_0)m31 \}$$

$$b15 = \frac{f}{D} \{ (Z - Z_0)m12 - (Y - Y_0)m13 \} - \frac{fNx}{D^2} \{ (Z - Z_0)m32 - (Y - Y_0)m33 \}$$

$$b16 = \frac{f}{D} \{ (Y - Y_0)m11 - (X - X_0)m12 \} - \frac{fNx}{D^2} \{ (Y - Y_0)m31 - (X - X_0)m32 \}$$

$$b_{21} = \frac{f}{D^2}(-m_{21}D + m_{31}Ny)$$

$$b_{22} = \frac{f}{D^2}(-m_{22}D + m_{32}Ny)$$

$$b_{23} = \frac{f}{D^2}(-m_{23}D + m_{33}Ny)$$

$$b_{24} = \frac{f}{D}\{(X - X_0)m_{23} - (Z - Z_0)m_{21}\} - \frac{fNy}{D^2}\{(X - X_0)m_{33} - (Z - Z_0)m_{31}\}$$

$$b_{25} = \frac{f}{D}\{(Z - Z_0)m_{22} - (Y - Y_0)m_{23}\} - \frac{fNy}{D^2}\{(Z - Z_0)m_{32} - (Y - Y_0)m_{33}\}$$

$$b_{26} = \frac{f}{D}\{(Y - Y_0)m_{21} - (X - X_0)m_{22}\} - \frac{fNy}{D^2}\{(Y - Y_0)m_{31} - (X - X_0)m_{32}\}$$

全ての像について(3.12)式を組み合わせることによって次のような連立方程式が得られる。

$$A1x1 + A2x2 = e \quad (3.13)$$

ここで、 $x1$ は各写真の外部標定要素の補正量ベクトルであり、 $x2$ は対象点座標の補正量ベクトルである。また e は残存量（計算残差）となる。

この e が最小になるよう計算を繰り返す（理想解は $e=0$ である）。⁽³⁾

3. 5. 線形化された共線方程式の解法（バンドル調整計算法）

(3. 12) 式は十分な写真と計測対象点が集まれば、未知数の数より式の数が多くなるため、最小 2 乗法を用いて解くことができる。たとえば対象点が 50 点、写真を 10 枚とし、全ての写真に全対象点が写っていたとする。すると像の数は 500 個となり、連立方程式 (3. 12) の式の数 は 1000、未知数の数は $10 \times 6 + 50 \times 3 = 210$ となる。

しかし、画像から得られる情報のみでは、尺度 (スケール)、絶対位置 (X, Y, Z)、軸方向角 (ω , ϕ , κ) の 3 種類、7 項目のデータについては取得することができない。このため、(3. 13) 式は 7 つのランク落ちとなり、逆行列をもたなくなるため通常の最小 2 乗法により解くことが出来ない。これを解くには 7 つの自由度を解消するため、同数の条件を付加しなければならない。どのような条件を付加するかによって各種の解法があるが、本手順では最も一般的な「内的拘束法」により (3. 13) 式を拡張する。

前述の 7 つのランクは独立して存在するので、行列 A に直行するベクトル $g_1 \sim g_7$ を考えて、それらを並べて出来る行列を

$$G = [g_1 \ g_2 \ g_3 \ \dots \ g_7] \quad (3. 14)$$

とすると、AG は直行行列となるため、

$$A_1 G_1 + A_2 G_2 = 0 \quad (3. 15)$$

となる。この G_1, G_2 を用いて、解 x_1 、 x_2 について、

$$G_1^T x_1 + G_2^T x_2 = 0 \quad (3. 16)$$

という条件をつける。(この条件は解のもつ 7 つの自由度を拘束するという意味合いを持つ)

この条件の下、

$$E = (A_1 x_1 + A_2 x_2 - e)^T (A_1 x_1 + A_2 x_2 - e) \quad (3. 17)$$

を最小にする x_1 、 x_2 を求めることで一意の解がえられる。この方法を内的拘束法と呼ぶ。

なお、 G^T は以下のように設定する。

$$G_1^T = \begin{pmatrix} \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & -Z_0 & Y_0 & 0 & 1 & 0 & \cdots \\ \cdots & Z_0 & 0 & -X_0 & 1 & 0 & 0 & \cdots \\ \cdots & -Y_0 & X_0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots \\ \cdots & X_0 & Y_0 & Z_0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

$$G_2^T = \begin{pmatrix} \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots \\ \cdots & 0 & -Z & Y & \cdots \\ \cdots & Z & 0 & -X & \cdots \\ \cdots & -Y & X & 0 & \cdots \\ \cdots & X & Y & Z & \cdots \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

のり面モニタリングにおいては2回の計測結果の比較により変移量を求める毎に、一方の結果を他方の結果に重ねあわせる座標変換処理を実施しているため、この時点では上に示した自由度の中で絶対座標に対する拘束は必要がないため、任意に拘束することができる。

しかし、スケールについては、変移量の絶対化に対して必要条件となる重要なファクターである。スケールを固定するために、2つのターゲット間を鉄パイプ等で固定し、変動かないようにしたターゲットペアを用意し、これを基準尺として、画面内に確実に写り込むように現場で撮影を行う必要がある。また計算に際しては、2点間の距離を固定する条件式を作り、これを線形化して共線方程式に組み込む。この基準尺を撮影することにより、スケールの自由度が固定されるため、最終的には、ランク落ちは6となる。(位置3、角度3)

基準尺の2ターゲットの座標を (X_1, Y_1, Z_1) 、 (X_2, Y_2, Z_2) とすると、その長さを d としたときの条件式は、

$$f = (X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2 - d^2 = 0 \quad (3.20)$$

となる。

それぞれの未知数について微分し、線形化した条件式を表すと、

$$\begin{aligned} & 2(X_1 - X_2) \Delta X_1 + 2(Y_1 - Y_2) \Delta Y_1 + 2(Z_1 - Z_2) \Delta Z_1 \\ & - 2(X_1 - X_2) \Delta X_2 + 2(Y_1 - Y_2) \Delta Y_2 + 2(Z_1 - Z_2) \Delta Z_2 = -f_0 \end{aligned} \quad (3.21)$$

と書ける。ここで、 f_0 は f に初期値を代入したときの値である。

複数の基準尺がある場合にはその数だけ条件式ができる。(3.21)式は対象点座標に関する連立方程式であるため、行列式としては、

$$As \ x1 + As \ x2 = es \quad (3.22)$$

と表記することができる。

内的拘束法の条件式および基準尺の条件式を、(3.13)式に組み込むと以下の様にあらわすことができる。

$$\begin{pmatrix} A1 & A2 \\ 0 & As \\ G_1^T & G_2^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e \\ es \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

第1行が共線方程式、第2行が基準尺拘束、第3行が内的拘束である。行列 G は共線方程式の係数行列 $A=[A1 \ A2]$ に直交した。これはまた AS にも直交する。したがって $G^T x=0$ という拘束のもとに AS を含む拡大された方程式について2乗誤差を最小化すればよい

この計算手順はバンドル調整計算と呼ばれており、解析写真測量計算の根幹となっている。⁽⁴⁾⁽⁵⁾

しかしながら、この計算は航空撮影カメラのように非常に高精度で組み立てられた光学系を使用し、レンズの歪みが極小となるようなカメラ（理想カメラ）で撮影された場合を想定している。

実際に民生用のカメラを使用した場合、そのレンズの精度は航空カメラに比べるとかなり低いため、レンズの歪み除去（キャリブレーション）が不可欠となる。だが、共線条件式(3.6)に、レンズ歪み項を付加した新たな式が提唱され、レンズ歪みを意識することなくバンドル調整計算を行うことが可能になった。

3. 6. レンズ歪みとセルフキャリブレーション

解析写真測量においては、偶然誤差の調整法として最小2乗法が用いられている。しかし、レンズ歪みについては、系統誤差として撮影装置毎に固有の誤差量となる。この系統誤差を、「誤差モデル」として、調整計算に付加することで、精度を向上させることが可能である。

これがセルフキャリブレーションの基本的な考え方である。

前出のバンドル調整計算に用いた共線条件式 (3.6) は、計測用にチューニングされた歪みのない高精度のレンズを想定して式を生成していた。

$$\begin{aligned}x &= -f \frac{m11(X-X_0)+m12(Y-Y_0)+m13(Z-Z_0)}{m31(X-X_0)+m32(Y-Y_0)+m33(Z-Z_0)} \\y &= -f \frac{m21(X-X_0)+m22(Y-Y_0)+m23(Z-Z_0)}{m31(X-X_0)+m32(Y-Y_0)+m33(Z-Z_0)}\end{aligned}\tag{3.6}$$

しかし、実際にのり面の計測を実施しようとする場合、市販のデジタルカメラの使用が前提となる。民生用品を使用するため、計測用レンズのように歪みが極小に調整されているわけではなく、理想の共線条件式を用いて解析写真測量を行うことは、レンズ歪みを要因とする精度の低下を招き、場合によっては十分に収束できない可能性がある。

レンズ歪みは歪曲収差ともよばれ、固定焦点距離のレンズでは固有のものであるが、ズームレンズでは焦点距離を変更する都度、収差の状態がランダムに変わる可能性もある。以下に、レンズ歪みの代表例を示す。

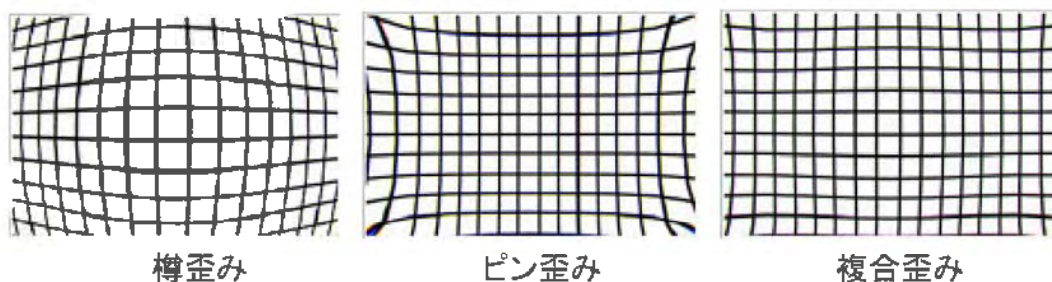


図 3.4 レンズ歪みの種類

樽歪みは主に長焦点距離で、ピン歪みは主に短焦点距離のレンズで発生するが、組立精度の低いレンズでは複合歪みとなることが多い。

共線条件式(3.6)を以下のように書き換えて、レンズ歪みによる対象物の撮像面上での“ぶれ”を付加する。

$$\begin{aligned}x - \Delta x &= -f \frac{m11(X - X_0) + m12(Y - Y_0) + m13(Z - Z_0)}{m31(X - X_0) + m32(Y - Y_0) + m33(Z - Z_0)} \\y - \Delta y &= -f \frac{m21(X - X_0) + m22(Y - Y_0) + m23(Z - Z_0)}{m31(X - X_0) + m32(Y - Y_0) + m33(Z - Z_0)}\end{aligned}\quad (3.24)$$

ここで、 Δx および Δy がレンズ歪みによる補正量となる。

レンズ歪みの補正量のモデル化については、Brown, Ebner, 村井らにより、様々なモデルが示されているが、本論文で作成したシステムでは、これらの中でもっとも最新のモデルとして、村井らの提唱するモデルを採用した。⁽⁶⁾⁽⁷⁾

$$\begin{aligned}\Delta x &= x_p - \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4) - (p_1 \bar{x} + p_2 \bar{y} + p_3 \bar{x}\bar{y} + p_4 \bar{y}^2) \\ \Delta y &= y_p - \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4) - (p_5 \bar{x}\bar{y} + p_6 \bar{x}^2)\end{aligned}\quad (3.25)$$

ただし、

$$\begin{aligned}\bar{x} &= x - x_p \\ \bar{y} &= y - y_p \\ r^2 &= \bar{x}^2 + \bar{y}^2\end{aligned}$$

ここで、 (x_p, y_p) は、主点位置（レンズの光軸が撮像面と交差する点）を示す。また、 $k_1 r^2 + k_2 r^4$ を含む項は、放射方向歪曲収差によるレンズディストーションを示し、最後の項はフィルムカメラにおけるフィルム面の平面度の歪みを示している。

これらの補正量は未知数として前節で示したバンドル調整計算に組み込まれており、補正係数の算出および補正量調整についても解析計算内で実施しながら解を求める方法を、セルフキャリブレーション付バンドル調整法とよび、最近の解析写真測量では標準的な手法である。⁽¹⁾

3. 7. 後方交会法による単写真標定

撮影したすべての写真について、ターゲットの画像座標を求めるため、すべてのターゲットを人手によりマーキングすることは、写真枚数およびターゲット枚数が増加すると非常に効率の悪い作業となる。たとえば写真50枚にターゲットが40点存在すれば、2000個のターゲット位置をあらかじめ画像上にマーキングする必要があり、数時間から1日程度を要してしまう。このため、画像ごとにターゲットを数点指定することにより残りのターゲットを自動推定してマーキングする機能は作業効率の維持のためには必要不可欠である。

カメラの位置と角度（外部標定要素）を推定することができれば、その値を用いて、ターゲットの3次元初期値から画像上のおよその座標を算出することができる。その画像座標をもとに画像上で周辺探索によりターゲットを特定できれば、自動推定機能を満足できる。

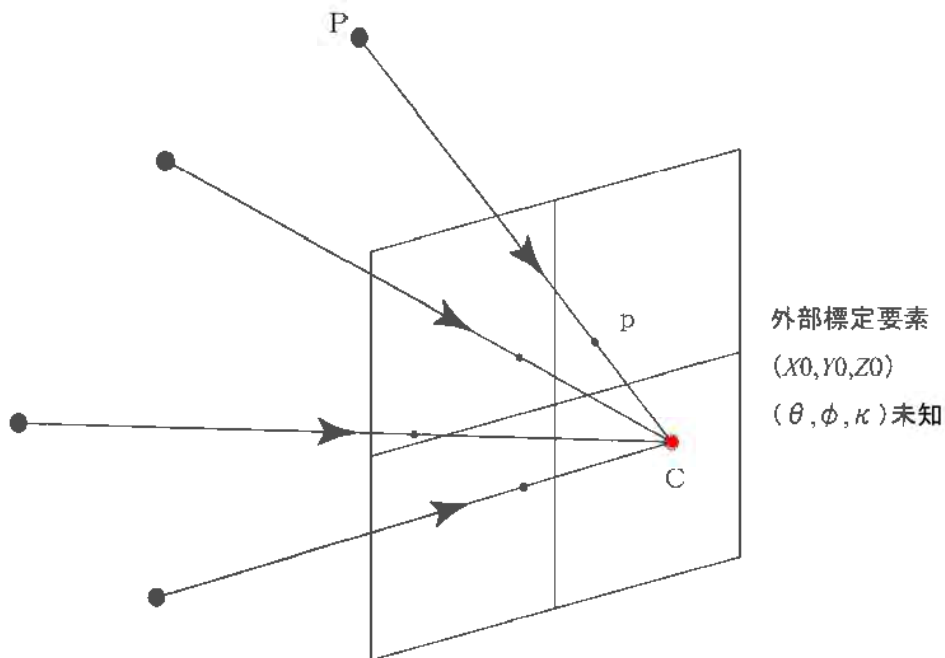


図 3.5 後方交会法のイメージ

カメラの位置と角度を推定するためには、前出の共線条件式を用いる。

共線条件式に、4点以上のターゲットの画像上の位置（ p ）、ターゲットの3次元座標（ P ）を与え、カメラの概略位置、概略角度を初期値（ C ）として、最小2乗法により計算することができる。この手法は、測量の用語から後方交会法と呼ばれるが、ミニバンドル計算と考えてもさしつかえない。（図 3.5）

もともと測量用語としての後方交会法とは、平板測量で行う交会法の一つで、求点に平板を整置し、3点以上の既知点を視準し方向線を引き、その交点で求点の位置を求める方法であるが、複数の既知点を視準することはターゲット点を与えることに相似しているため、この用語が用いられる。

また、カメラの位置と角度（外部標定要素）を推定計算することを外部標定と呼ぶ。なお、これに対して、前出の共線条件式に追加したレンズ歪み係数含め、レンズ主点位置、レンズ焦点距離等のカメラ内部にかかわるパラメータを内部標定要素と呼ぶ。

なお、上で4点のターゲット座標（画像・3次元）を与えるとしたのは、式の上では3点で確定するが、計算の特性上、特定の座標軸の象限が逆転する場合（符号の正負が逆になる場合）があるため、これを補完する目的で4点以上を与えている。

カメラの外部標定ができれば、あとは、各ターゲットの3次元座標（解析初期値）を共線条件式に与えることで、順次その2次元座標（画像座標）を算出することが可能である。この作業は後方投影（バックプロジェクション）と呼ばれる。⁽¹⁾



図 3.6 後方投影によるターゲットの推定位置表示

後方投影によりターゲットの推定画像座標を求めても、与えられたターゲット

トの3次元初期値座標は概略値であるため、実際の画像上のターゲット位置と比較するとずれが生じている。このずれを補正するため、推定画像座標の近傍のターゲットを画像処理により検出し、そのターゲット部分の画像重心を求めることで、すべてのターゲットの画像座標を求めることができる。

参考文献

- (1) 村井俊治, 1983, 解析写真測量, 社団法人日本写真測量学会
- (2) 村井俊治, 近津博文監訳, 2002, デジタル写真測量, (社) 日本測量協会, (Toni Schenk: Digital Photogrammetry Volume I)
- (3) 秋本圭一, 服部進, 1997, 画像計測の基礎, 岡山職業能力開発短期大学校紀要, 第 11 号, pp23-38
- (4) 秋本圭一, 服部 進, 1999, 工業写真計測における共線方程式, 香川職業能力開発短期大学校紀要
- (5) Akimoto. K, C. Fraser, H. Hasegawa and S. Hattori, 1998, Comparison of Free Network Solutions by the Artificial Basis-Based Method with One by the Generalized Inverse in Vision Metrology, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII, Part5, pp. 17-22.
- (6) Brown, D. C. , 1972, Calibration of Close-Range Cameras, XII Congress of the International Society of Photogrammetry, Ottawa, Canada.
- (7) 村井, 奥田, 中村, 1981, 非測定用カメラを用いた解析的写真測量に関する研究, 東京大学生産研究所報告, Vol. 29, No. 6, July 1981.

第4章 精度の評価

4. 1. 概説

本章では、前章で示した数学的原理をベースに基本的な解析システム（精密写真測量システム）を作成し、模擬試験現場での計測結果をもとに精度の評価および精度判定の基準となる指標について考察を行った。また、実際に現場で行った光波測量、鋼巻尺との計測結果との比較を実施した。なお、現場における計測環境が一樣ではないため理論値ではなく実験結果をもとにした経験値として精度の評価を行った。

4. 2. 内的精度（計算精度）

写真測量の実験結果のデータについては、内的精度（または計算精度）という表記が多く箇所でなされている。これは、写真測量の収束計算（バンドル調整計算）において、3次元座標値の計算残差の標準偏差を表している。データの分布が正規分布 $N(m, \sigma^2)$ に従うとき、 $m \pm 1\sigma$ 、 $m \pm 2\sigma$ 、 $m \pm 3\sigma$ の範囲に含まれるデータは、それぞれを全体の百分率で表すと、以下のとおりである。（ただし、 m は平均値を、 σ^2 は分散を、 σ は標準偏差をそれぞれ示す。）

$$m \pm 1\sigma = 68.26\%$$

$$m \pm 2\sigma = 95.44\%$$

$$m \pm 3\sigma = 99.74\%$$

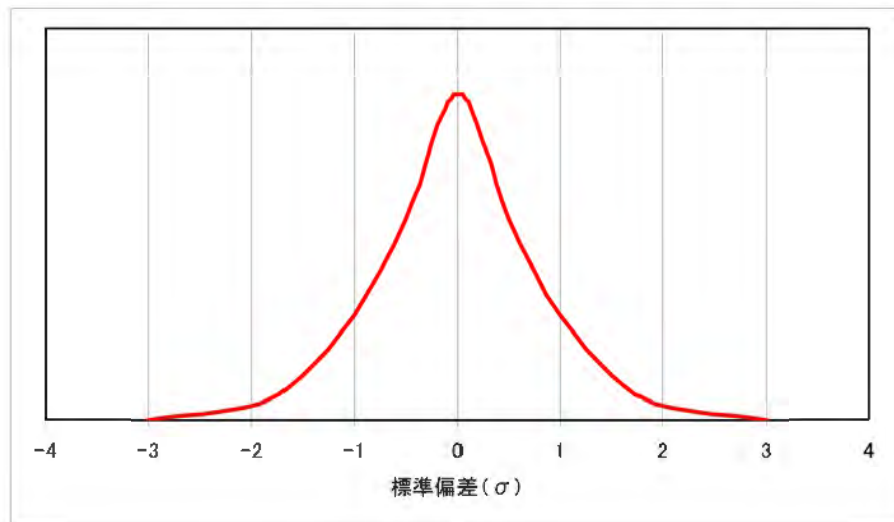


図 4.1 標準偏差について

つまり、内的精度（標準偏差）を算出することで、計算上のデータの誤差分布を把握することができる。また、 3σ をこえて平均値から離れるデータ（計算結果）はほとんどない（0.26%）ため、解析結果が 3σ を超える値を異常値と呼んでいる。⁽¹⁾

4. 3. 内的精度と外的精度

このように内的精度とは、収束計算の3次元座標値におけるそれぞれの軸方向の計算残差の標準偏差を示している。これは、理論値と計測値の誤差を示す指標となる。これとは別に、外的精度と呼ばれる精度値が存在する。外的精度は、計算結果の値と真の値との差を示すが、真の値を計測する手段はないため、通常は、他の計測手段により得られた値と比較をする方法で外的精度を求める。しかし、精密写真測量においては、精度が非常に高く、後に示すように光波測量と同程度の精度を有していることが確認されている。

このため、光波測量による結果を真の値とした場合、光波測量結果の誤差量进行评估する手段をもたなければ、結局真の値は求めることができない。これとは別に、固定された同一のターゲットを複数回計測して、繰り返してその値を比較することで、データの再現性を求めることはできる。この場合、ターゲットの変位は0であるため、2回の計測結果の間に差が生じれば、これは計測のばらつきによる誤差とみなすことができる。

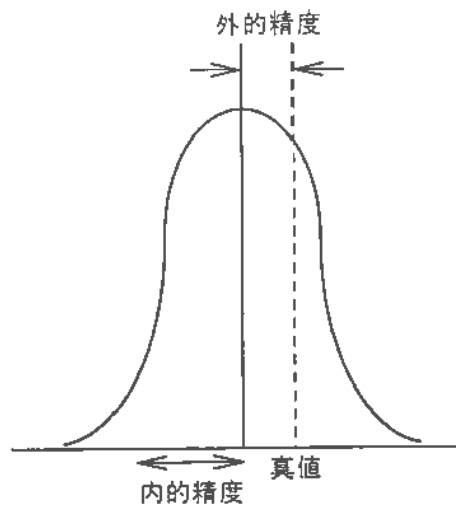


図 4.2 内的精度と外的精度

4. 4. 読取精度

収束計算結果から求めた、写真上の2次元座標値とあらかじめ計画行列を作成する際に使用した座標値（読取り値）の差を計算し、この標準偏差を求めたものが読み取り精度である。読取精度は、画像からターゲットの中心をどの程度正確に読み取ることができたかを知る目安となる。計算結果はミリメートルの値で求められるが、通常は、この値を CCD の画素サイズ（ピクセルサイズ）で割ることで比の値として用いられることが多い。⁽¹⁾

4. 5. 精度の経験式

精密写真計測の精度は、経験的に下式により定義できると言われている。⁽¹⁾

$$\text{精度} = k \times 1/n \times 1/p \times L/f \quad (4.1)$$

ここで k : 定数 (ネットワーク強度)

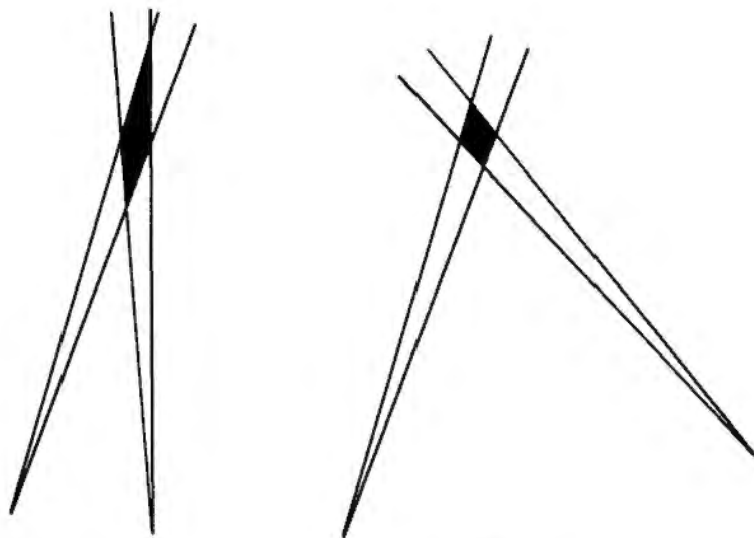
n ; 写真枚数

p ; ターゲットの数

L ; 撮影距離 (対象点までの距離)

f ; 焦点距離

上式の k はネットワーク強度またはネットワーク定数と呼ばれる定数である。この値は、特に固定値として定義される値ではなく撮影条件等により変化する。このため定量化することが難しく、図 4.3 に示すように、どちらかといえば定性的な値として認識されている。また、この式で表した精度とは漠然とした広義の意味合いで示されているが、通常では精密写真測量で実施した結果としての精度は先に示した内的精度を指しているが、それとの関係については明確に記されていない。



(a) 弱いネットワーク
2枚の写真の角度が小さい
とき、対象点の存在範囲は
広い。

(b) 強いネットワーク
2枚の写真の角度が大きい
ので、対象点の存在範囲が狭
い。

図 4.3 強いネットワークと弱いネットワーク

写真撮影を行う際に、対象物の周囲からぐるりと取り囲むように撮影することで、ネットワーク強度は最も強くなるといわれている。このような撮影方法は収束撮影と呼ばれるが、土木分野の計測に於いては撮影できる個所が限られているため、収束撮影を行うことは不可能である。

(4.1)式によれば、精度を向上させるには、次のような方法で撮影を行えば良いことになる。

- ① なるべく多くの写真で解析する。
- ② たくさんのターゲットを写しこんで解析する。
- ③ 近くの距離から撮影する。
- ④ 長焦点のレンズを使って撮影する。
- ⑤ 高性能（高画素数）なカメラで撮影する。

さらに、実際の現場で精度に寄与する重要な点は以下のとおりである。

- ⑥ 多くのいろいろな方向から角度をつけて撮影する。
- ⑦ ターゲットの大きさ

また、前章で示したようにレンズひずみの系統誤差を低減させるため、撮影に当たってはカメラをレンズの光軸にそって0度、90度、180度、270度と回転させて同一地点から撮影することが望ましいとされている。

しかし、写真枚数を単に増やすのみでは精度が向上しない場合もあり、その場合にはネットワーク定数(k)を増強するように条件⑥に示したように、多くのいろいろな方向からの角度をつけて撮影することができるよう、枚数を増やす際の撮影位置の検討が必要となる。

ただし、これらの条件は経験則によるものであり、これらの条件に適合するように撮影した画像を解析した結果について、精度がどの程度であれば適正であるかという点については、評価を定量的に行うことが出来ない。つまり、計画を立案してもその計画が適正かどうか、または撮影地点を変更することでどの程度精度に変化があるかという点については、現地で実際に計測するまではわからないということになる。これが、第1章で示した問題点の二番目の項目であり、土木分野での精密写真測量導入への否定的な要素となっている。

撮影計画を立案する段階で、撮影位置と写真枚数からおよその精度を推定することができれば、実際に計測し解析した結果についての適否を判断することが可能である。

4. 6. 解析システムの開発

ソフトウェアシステムの開発を行い、作業手順に従ったプログラム進行で、撮影データの取り込み、ターゲット・カメラ位置初期値設定、画像のターゲット位置特定、バンドル調整計算、結果の確認と比較という処理が操作者にわかりやすいプログラムを作成した。ソフトウェアによる処理のサンプル画像を以下に示す。

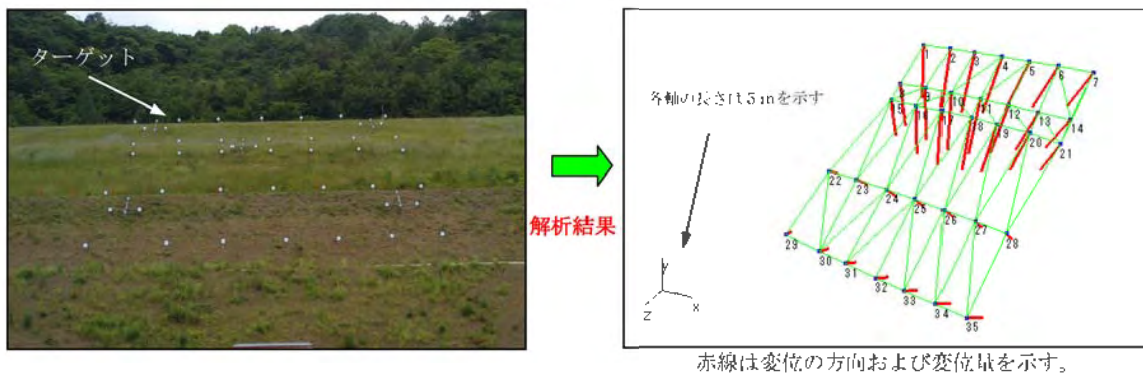


図 4.4 計測結果例

4. 7. 模擬のり面での変位量計測試験

精密写真システムの計測精度を検証するために、実際の現場のり面の約 1/2 の撮影距離が確保できる屋外フィールドにおいて、可動ターゲットおよび固定ターゲットを設置した模擬斜面を、撮影距離と使用レンズを各 3 種類変化させて「移動前」「移動後」の 2 回の撮影を行い、レンズ焦点距離と撮影距離、計測精度の関係を求める試験を行った。

4. 7. 1. 実施概要

以下に実施手順および実施概要をまとめる。

(a) 作業手順

図 4.5 に作業手順のフローを示す。

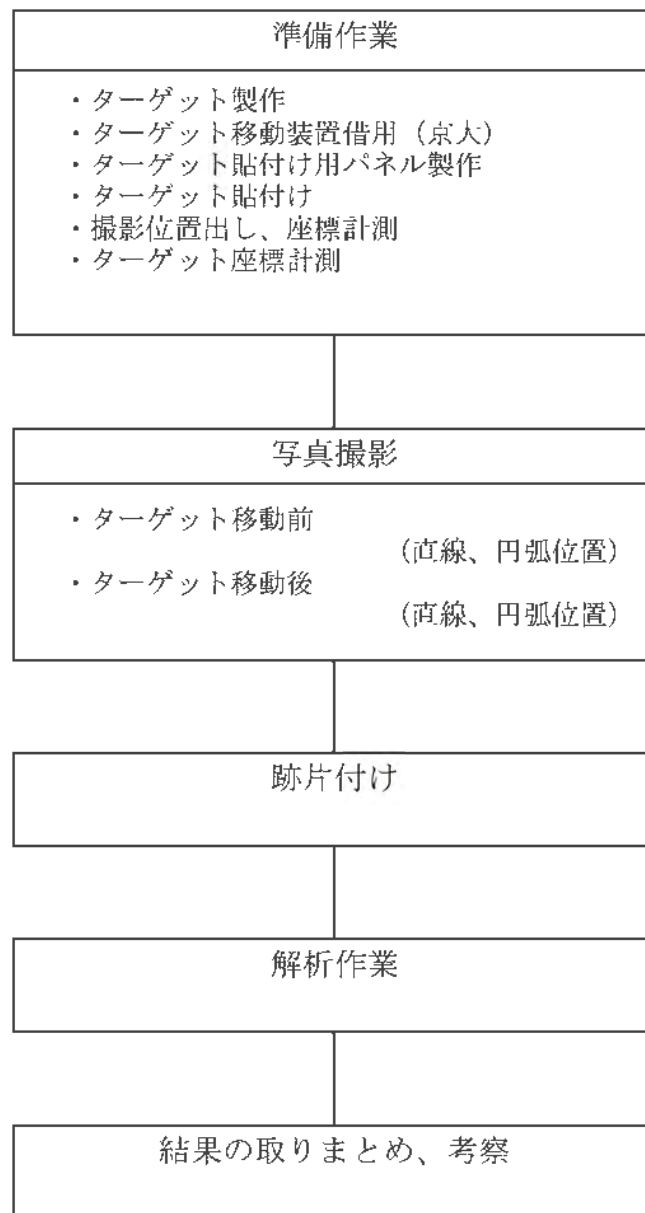


図 4.5 フィールド実験 作業手順

(b) 計測試験内容

実験のために撮影したレンズ焦点距離および撮影距離の組合せ、撮影地点数は以下のとおりである。

表 4.1 フィールド実験 撮影ケース一覧表

撮影距離	使用レンズ	撮影箇所			移動なし		移動あり		撮影枚数
		直線	円弧	計	直線	円弧	直線	円弧	
45m	35mm	5	-	5	ケース1	-	ケース16	-	40
	50mm	5	-	5	ケース2	-	ケース17	-	40
	85mm	5	-	5	ケース3	-	ケース18	-	40
35m (円弧37m)	35mm	7	7	14	ケース4	ケース5	ケース19	ケース20	112
	50mm	7	7	14	ケース6	ケース7	ケース21	ケース22	112
	85mm	7	7	14	ケース8	ケース9	ケース23	ケース24	112
25m	35mm	7	6	13	ケース10	ケース11	ケース25	ケース26	104
	50mm	7	6	13	ケース12	ケース13	ケース27	ケース28	104
	85mm	7	6	13	ケース14	ケース15	ケース29	ケース30	104
		撮影総計							768

移動量	0mm、10mm、20mm（撮影距離45mでは任意）
ターゲット数量	35個（配置：7個×5段：600mm間隔）
移動ターゲット数	X、Y、Z方向各3台 合計9台
ターゲット貼り付けパネル	横4m X 縦3m
ターゲットサイズ	アルミ複合板 200x200mmx t=3mm（白色部150x150mm）

(c) 使用機材

実験に使用した機材は以下のとおりである。

- ①デジタルカメラ NikonD100（レンズ焦点距離 35mm 50mm 85mm）
 - ②フィールド実験用ターゲット（200×200mm）35個
（カラープリンターの光沢紙に印刷したものを、アルミ複合板に貼付けて作成）
 - ③ターゲット移動装置（デジタルノギス付き4台、ノギス無し5台）
 - ④カメラ回転台、三脚
 - ⑤ターゲット貼付けパネル用材料
- その他：コンパネ、単管、クランプ、2tトラック（ロング）

(d) 試験方法

コンパネ等により製作した横4m×縦3mのパネルに、26個の固定ターゲット及び9個の移動可能ターゲット（XYZ方向各3個）を設置した。（図4.11）移動可能ターゲットを、XYZ方向にそれぞれ「移動なし」、「移動あり（10mm、20mm移動、45mのみ移動量は任意）」の場合において、撮影距離を45、30、20m、使用レンズを35、50、85mmの3種類変化させて撮影を行い、本ソフトウェアを操作してレンズ焦点距離と撮影距離、計測精度の関係を求める試験を行った。

このとき、操作手順の流れ、各処理の平均所要時間についても確認した。撮影位置は、図4.13に示すとおりターゲットに対して正面中心を含め左右等間隔に7箇所（用地の制限から45mのみ5箇所）とし、中心角度は、ターゲットまでの距離（Dm）に対して、左右方向に土約 $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ Dm程度とした。（実際現場の撮影状況に準じた）ターゲットのサイズは、現場とテストフィールド内での撮影距離の関係（ $1/2$ =フィールド45m/現場平均90m）から、現場ターゲット（400mm×400mm）の $1/2$ のサイズ（200×200mm）で製作した。



図4.6 フィールド実験用ターゲット

(e) 検証項目

実験で、明確にしようとした項目は以下の6項目である。

- ①撮影距離別、使用レンズ（焦点距離）別 取得精度の比較
- ②精度（内的、外的）と L （撮影距離）／ f （焦点距離）との関係（図）
- ③座標変換有無別 取得精度の比較
- ④解析対象ターゲット数別 取得精度の比較
- ⑤撮影地点（枚数）別 取得精度の比較
- ⑥長さ情報有無別 取得精度の比較

写真測量においては、撮影距離（計測距離）のみが精度の重要なファクターになるわけではなく、使用したレンズやターゲットの大きさも、精度を左右する要因となる。また、計算原理から、ターゲットの個数、写真の枚数、撮影方向の多様性も重要なファクターとなっている。

これらの要素を組み合わせることで撮影を計画した。

また、最終的に実測値の比較と、実験の再現性を高めるため、撮影位置は予め計測された位置で固定した。

各撮影位置では、カメラを光軸周りに90度ずつ回転させながら4枚の画像を取得することとした。また、撮影条件をそろえるため、露出計によりシャッタースピードとレンズ絞り値は常に同一露光になるよう毎回調整するよう規定した。

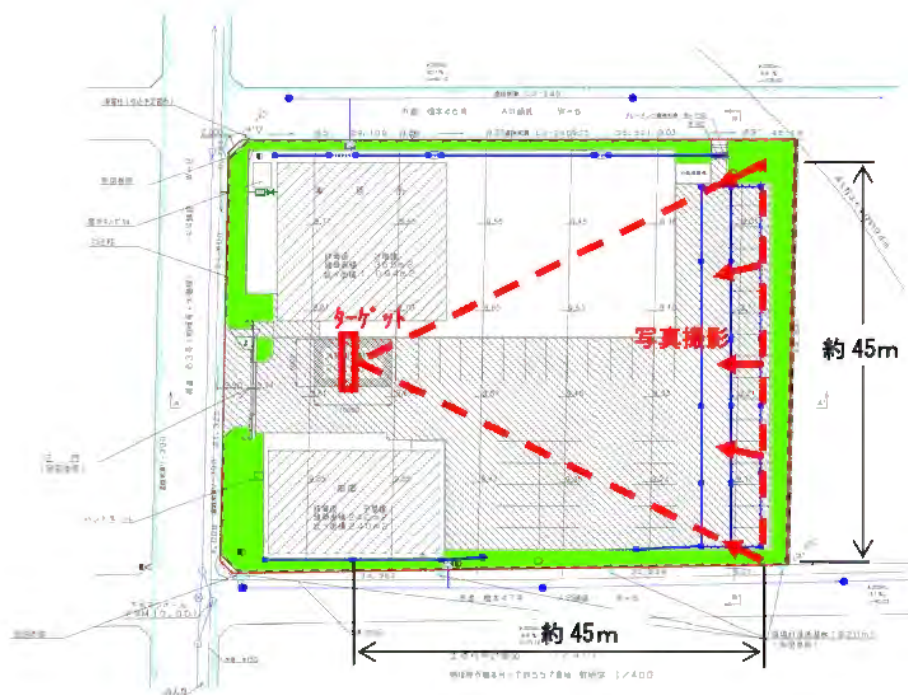


図 4.7 フィールド実験平面図

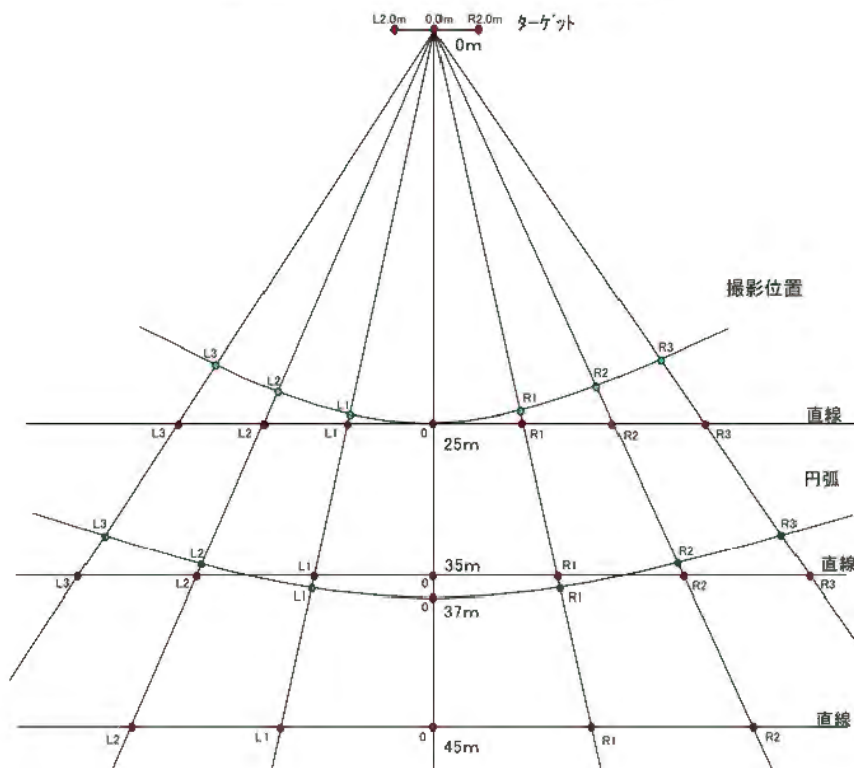


図 4.8 フィールド実験撮影位置概念図

(f) ターゲット配置位置の計測

ターゲットの配置は、図 4.6 の通りである。
 それぞれの間隔については、実験前にあらかじめ3 角形メッシュを形成するように、鋼巻尺により計測した。計測結果を元に、3 辺測量の要領でCAD 上に描画し、CAD 画面から、XY 座標を読み取った。(図 4.9 および図 4.10)

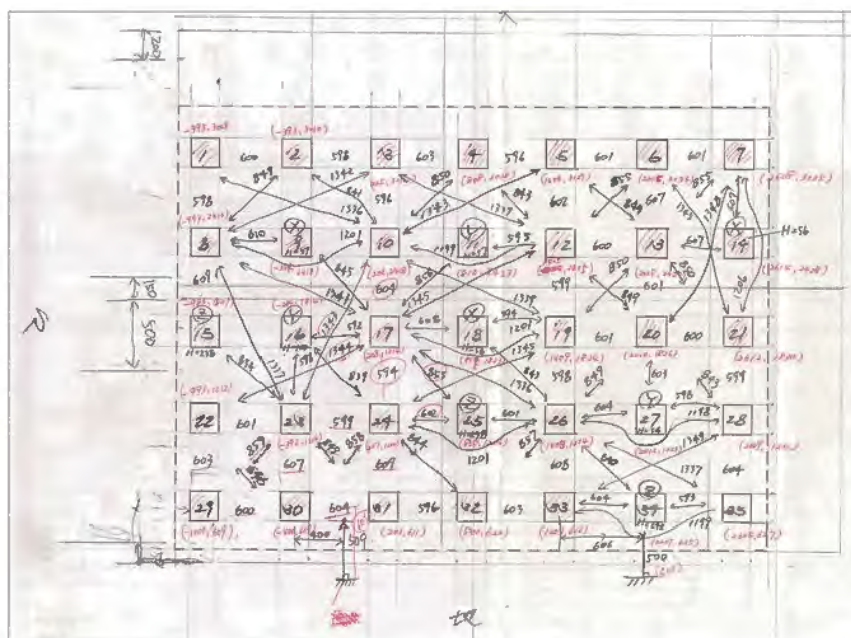


図 4.9 ターゲット配置位置の実測データ

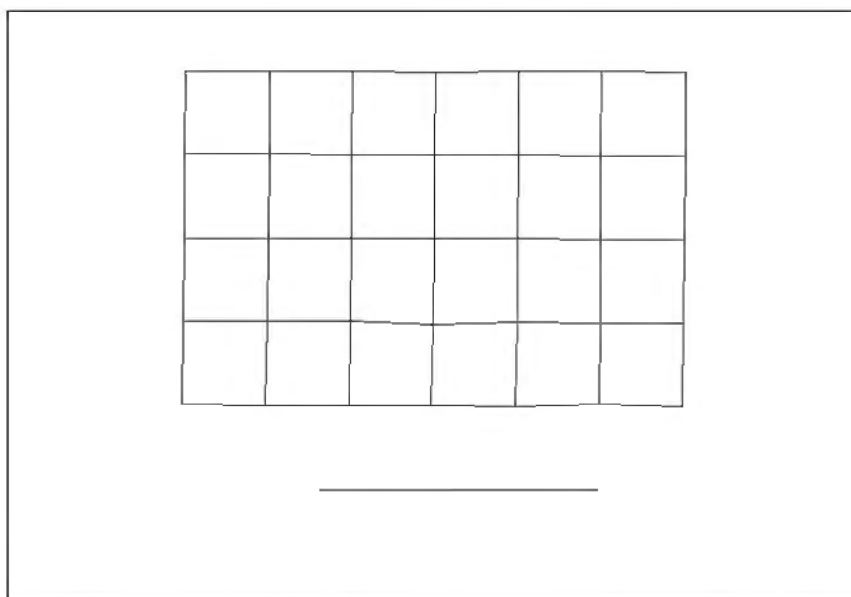


図 4.10 CADにより描画したターゲットのXY面上の配置

(g) 実験状況

供用前の駐車場を利用して、ターゲットの設置をおこない、あらかじめ位置を決定した計測点から写真撮影を実施した。以下に実施状況の写真を示す。



試験フィールド全景



ターゲットパネル



ターゲット移動装置をX,Y,Z方向に各3台ずつセットした。



カメラ回転装置（正面）



カメラ回転装置（側面）

図 4.11 フィールド実験状況写真

カメラ回転装置は、光軸を中心にカメラを0度、90度、180度、270度の回転各で保持して撮影を容易にしようとするものである。実際の現場計測に於いては手持ちで撮影される場合が多い。

4. 7. 2. 実施結果

以下に実験結果をまとめた。

(a) ターゲット全体

ターゲットのうち、No9、No11、No14、No15、No16、No18、No25、No27、No34の各ターゲットは、ターゲット移動装置に装着してあり、X、Y、Z方向にそれぞれ3つのターゲットを割当て移動前と移動後の2回、写真撮影を行うことで変位量を計測するよう計画した。

ターゲット移動装置の移動方向は、作成したパネル面の左右方向をX方向、上下方向をY方向、前後方向をZ方向とし、概ねそれぞれの方向に移動するように装置を装着した。また、Z方向については移動装置に装着されているノギスにより移動量を計測したが、XY方向については、簡易型の移動装置であったため、1mm精度のメジャーにより計測した。

撮影方向は、撮影距離が45mで5方向、撮影距離がそれ以外で7方向であったため、撮影距離45m以外の解析では、7方向から撮影した場合と5方向(両側2方向を除外)の場合で別に解析を実施した。

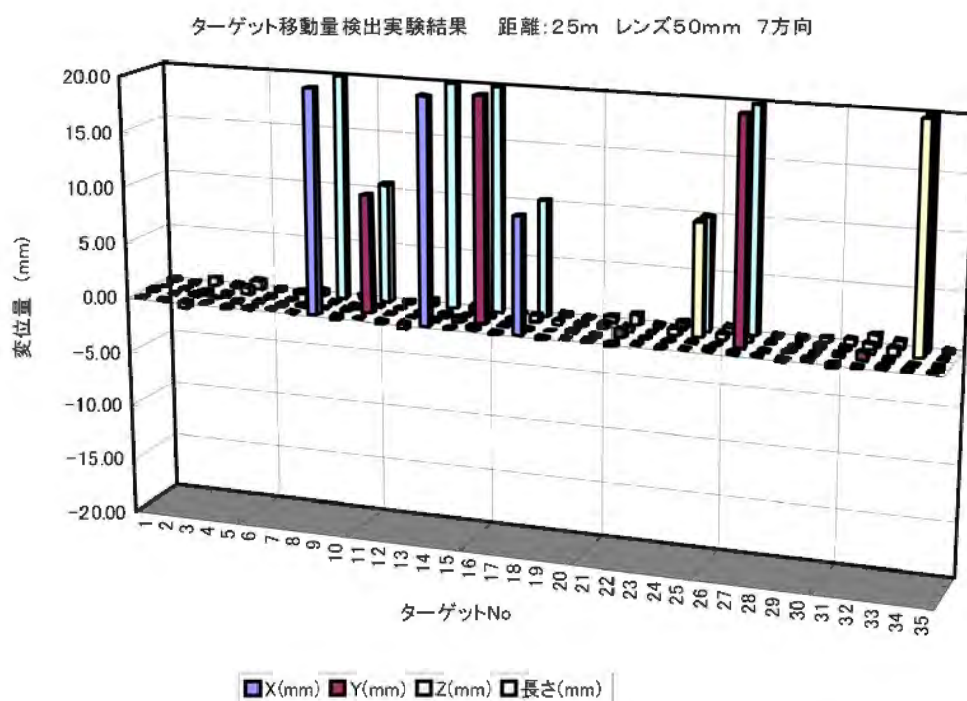


図 4.12 ターゲット移動量検出結果例 (撮影距離 25m)

図 4.12 は、撮影距離 25m、レンズ焦点距離 50mm で7方向から28枚の画像を撮影して、それぞれのターゲットの移動前と移動後の解析結果の差分をグラフ化したものである。図の「X,Y,Z,長さ」はそれぞれ軸方向の差分量と差分量の合成ベクトルの長さ(実移動量)を示している。基本的に稼動ターゲットの設置はX,Y,Z軸にそれぞれ

平行になるように実施しているが、手作業による設置であるため、軸方向に完全に一致しているわけではない。

図 4.12 に示すとおり、No11, No18, No25 のターゲットについてはそれぞれ 10mm 移動させて、No9, No14, No16, No27, No34 のターゲットについてはそれぞれ 20mm 移動させて移動前後の差分量を計測したが、計測結果は各ターゲットの移動量をほぼ忠実に反映していることがわかった。表 4.2 は、各ターゲットの移動量をそれぞれの解析ケースごとにまとめ、平均を求めたものである。実移動量と比較して誤差が非常に小さいことがわかる。

表4.2 ターゲット移動量検出実験結果 移動量解析結果一覧(移動ターゲット)

No	撮影距離	25m			25m円弧	35m			37m円弧		標準偏差	平均値	実移動量
	レンズ	35mm	50mm	85mm	35mm	35mm	50mm	85mm	35mm	50mm			
9		20.15	19.99	19.95	19.93	20.04	20.67	20.53	20.55	19.89	0.30	20.19	20
11		10.04	10.55	9.98	10.78	9.94	9.70	10.00	10.09	10.30	0.34	10.15	10
14		20.21	19.59	20.25	20.45	19.29	19.19	19.41	19.75	20.77	0.56	19.88	20
15		1.16	1.26	0.67	1.21	2.06	0.60	0.39	0.88	0.63	0.50	0.98	0
16		19.91	20.47	19.55	20.18	19.26	20.47	19.97	19.47	19.93	0.43	19.91	20
18		10.28	10.04	10.47	10.12	9.75	10.02	10.00	10.83	10.01	0.32	10.17	10
25		9.67	9.69	10.46	9.53	9.25	10.92	9.43	11.52	10.79	0.80	10.14	10
27		19.52	20.01	19.48	19.80	20.18	19.92	19.88	19.84	19.85	0.22	19.83	20
34		18.78	20.17	19.89	20.56	20.00	20.50	19.49	20.02	20.16	0.54	19.95	20
9		19.96	20.02	20.18	20.09	20.45	20.46	20.62	20.79	20.25	0.28	20.31	20
11		10.08	10.52	10.29	10.69	9.23	9.79	10.04	10.27	10.37	0.44	10.14	10
14		19.76	20.15	20.14	20.42	19.28	19.25	19.71	19.90	20.42	0.44	19.89	20
15		1.07	0.39	0.77	0.25	0.67	0.18	0.48	0.68	0.78	0.29	0.59	0
16		19.77	20.22	19.94	19.80	19.39	20.11	20.07	19.51	19.84	0.27	19.85	20
18		9.98	10.29	10.21	10.10	9.48	9.82	10.12	11.02	10.19	0.42	10.14	10
25		10.06	9.96	10.50	10.23	9.07	9.68	10.28	11.67	9.66	0.72	10.13	10
27		19.64	19.84	19.81	19.77	19.83	19.85	19.81	19.89	20.20	0.15	19.85	20
34		19.48	20.99	20.19	19.81	18.91	19.40	20.55	19.96	19.01	0.69	19.81	20

数字の単位はmm

上半分は7方向から撮影、下半分は5方向からの撮影による結果

撮影距離 45mの試験については、事前にターゲット移動量を計測せず、解析結果から逆にその値を求め、レンズ 35mm、50mm、85mmでの結果の違いを確認した。(図 4.13)

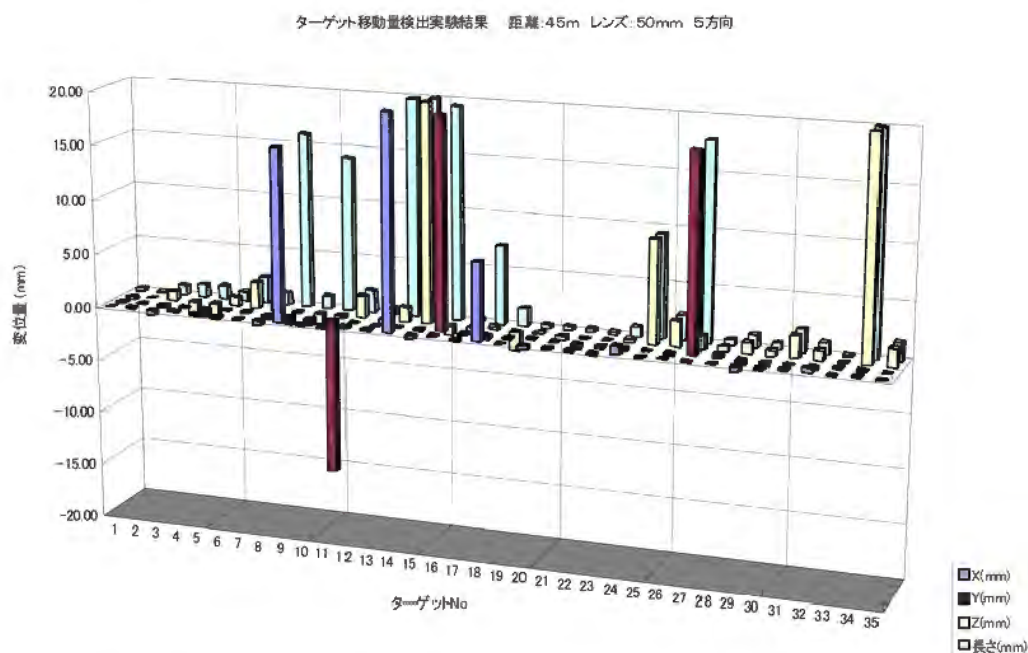


図 4.13 ターゲット移動量検出結果例 (撮影距離 45m)

表4.3 ターゲット移動量検出実験結果 移動量解析結果一覧(移動ターゲット)

No	35mm	50mm	85mm	平均値	標準偏差
9	16.73	16.02	16.05	16.27	0.40
11	14.31	14.08	13.69	14.03	0.31
14	19.46	19.85	19.67	19.66	0.19
15	24.89	20.44	21.06	22.13	2.41
16	20.68	19.42	19.75	19.95	0.66
18	8.08	7.21	7.15	7.48	0.52
25	11.10	9.44	10.61	10.38	0.85
27	18.23	17.95	18.25	18.14	0.17
34	24.93	21.66	20.06	22.22	2.48

撮影距離:45m

数字の単位はmm

実移動量は未計測

表 4.3 は、撮影距離 45mでのターゲットの移動量の計測結果を示す。ターゲット番号 16 およびターゲット番号 34 を除き、誤差が非常に小さいことがわかる。

(b) 移動させないターゲットの計測結果（不動点のみ）

移動装置に装着していないターゲットは、1回目（移動前）、2回目（移動後）の計測において不動点とみなすことができる。このため、2回の計測結果について、各不動点の変位量を差分の形でまとめて外的精度（絶対精度）を検証した。移動量計測を実施した5方向と7方向でそれぞれ別にデータをまとめた。以下に例を示す。

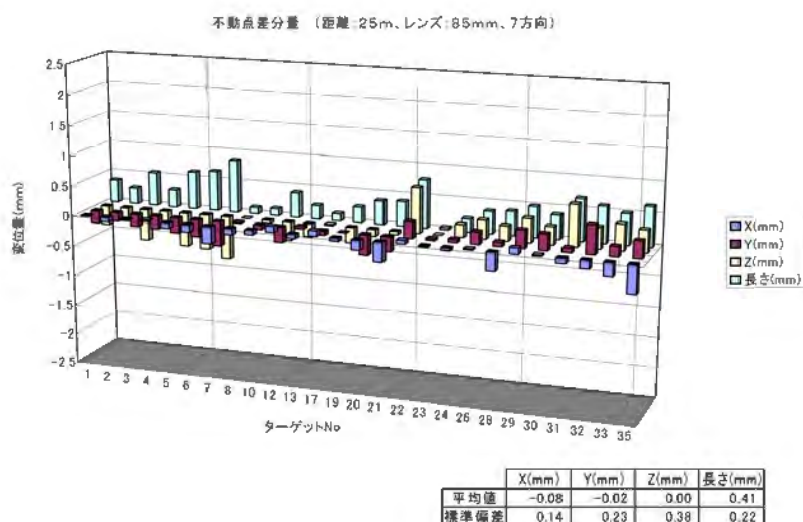


図 4.14 7方向での不動点の変位量計測結果例（撮影距離 25m）

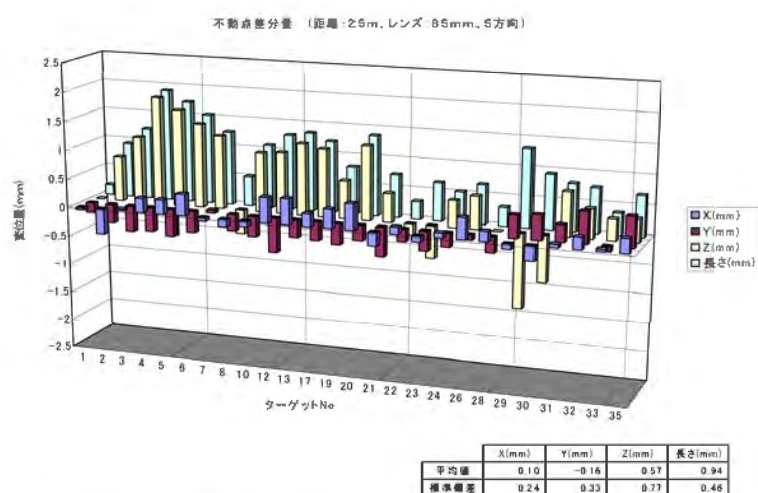


図 4.15 5方向での不動点の変位量計測結果例（撮影距離 25m）

図 4.14、図 4.15 に示すように、同じ撮影距離、レンズ焦点距離でも撮影方向数（または枚数）の違いにより結果が異なり、すべてのターゲットについて7方向で撮影した結果の長さ方向の変移量の平均値は 0.5mm 以下であったのに対し、5方向から撮影した結果は約 1mm となっていることがわかる。

(c) 撮影ケースと精度との関係

図4.16 計測精度-L/f値 相関図 (全データ)

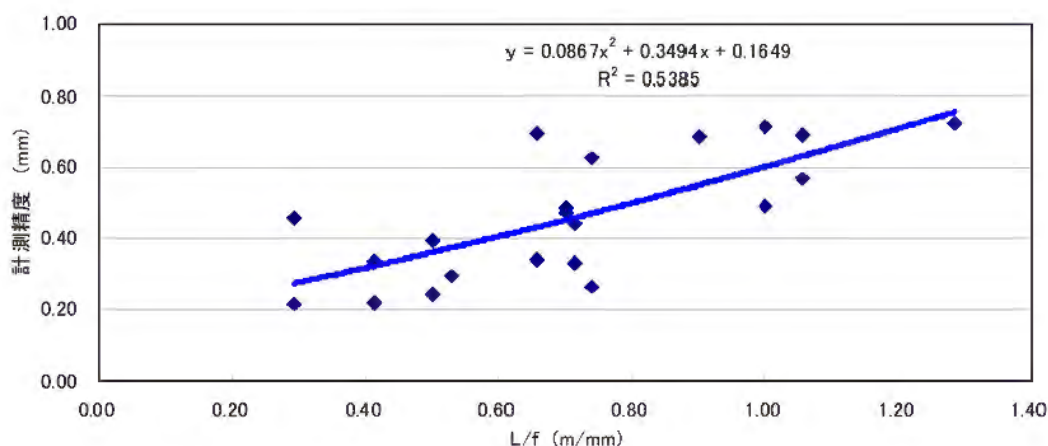


図 4.16 は、全ての解析ケースにおいて、不動点の差分の X Y Z の各軸方向および長さ方向の値の標準偏差 (σ) をもとめ、これと L / f 値 (レンズ・撮影距離比) との関連を調べたものである。

図4.17 計測精度-L/f値 相関図 (撮影方向別)

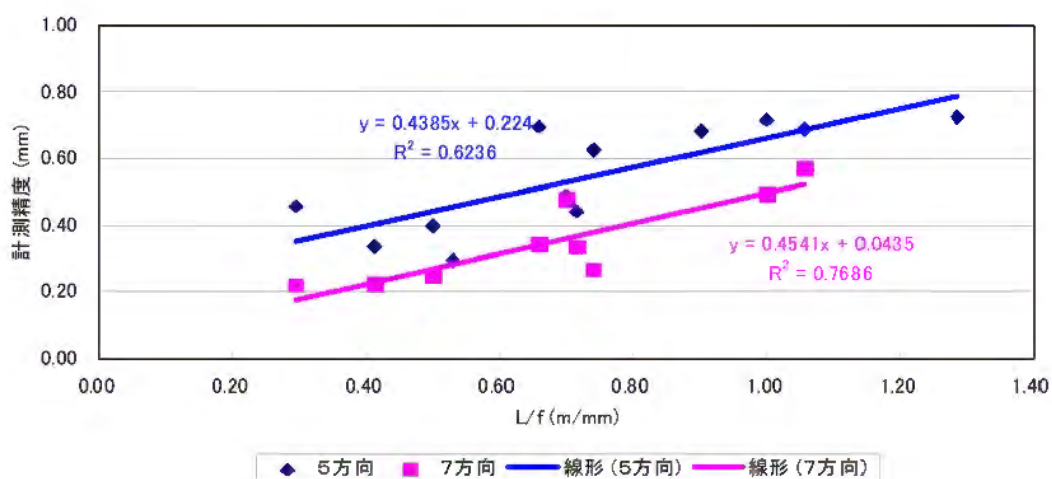


図 4.17 について、5 方向からの撮影と 7 方向からの撮影についてデータを分けて表示したものが図 4.16 である。撮影方向数ごとに、それぞれ L / f 値との相関があることがわかった。また、全体的に 7 方向 (28 枚) で撮影した結果の方が、高い計算精度を示している。

つぎに、解析結果の計算精度（内的精度 σ ）と、ここで求めた計測精度の関係について図 4.18 にまとめた。

図4.18 計測精度－計算精度相関図（全データ）

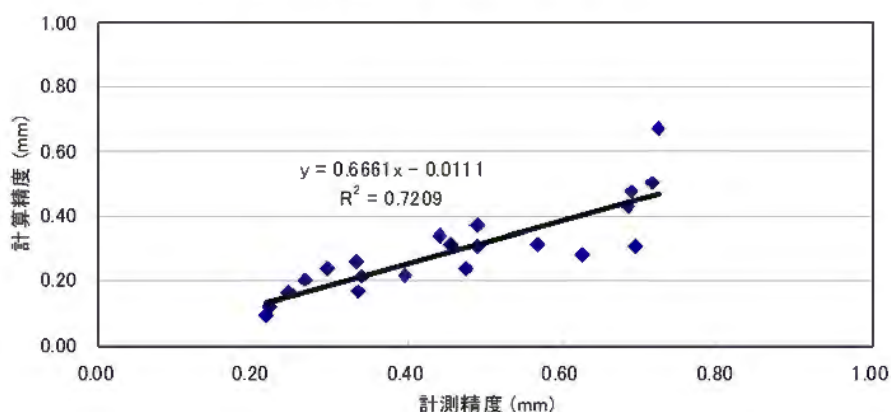
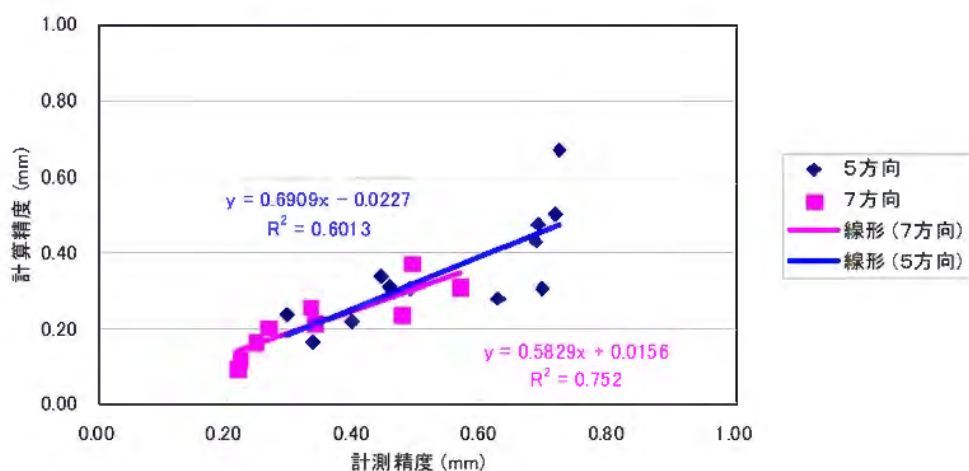


図 4.18 から、計測精度と計算精度（内的精度 σ ）の間には、正の相関があることがわかる。

図4.19 計測精度－計算精度相関図（撮影方向別）



また、このデータを7方向および5方向の結果で分けると、それぞれ異なる近似直線で表されることがわかる。（図 4.19）

以上のことから計算精度（内的精度）および計測精度には、かなり高い1次の正の相関関係がありことが想定され、計算精度（内的精度）で各種の解析結果を判断することで、およその計測精度を類推できることがわかった。

計算精度（内的精度）と L/f 値（レンズ・撮影距離比）の関係を調べるため、全解析ケースの計算精度（内的精度）を L/f 値でまとめた図 4.20 を作成した。

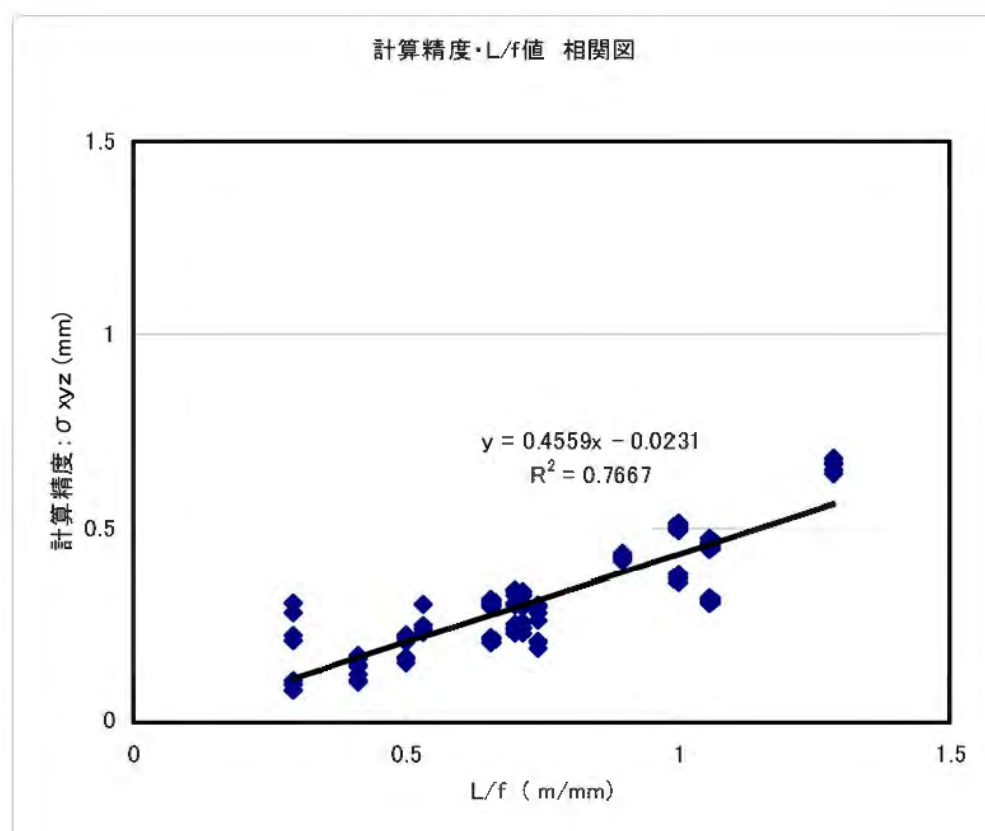


図 4.20 全解析データの内的精度の直線近似

図 4.20 の結果から、計算精度（内的精度）と L/f 値とは、ほぼ直線で近似することができると考えられる。

全体に計算精度（内的精度）は非常に高くなっているが、計算精度（内的精度）が特に高い部分で、データにばらつきがみられる。これは、スケール（基準尺）として現場で 4 隅にある 2 つのターゲットをペアとして計測し、その間隔を用いているが、スケールの測定精度が高々 1 mm 以下程度であるため、0.2 mm ~ 0.3 mm という高い計算精度（内的精度）に対してこの値を使用すると、逆に全体精度を低下させるためであると考えられる。

このように非常に高い計算精度（内的精度）を要求する場合にはスケール（基準尺）の精度が重要な要素となるが、斜面の現場における要求精度は、現状では 1 mm 以下にはならないので実用上は問題にはならない。

次に、5方向と7方向での撮影数の違いによる計算精度（内的精度）の比較を実施した。（図 4.21）

図 4.21 5方向・7方向 計算精度対比図

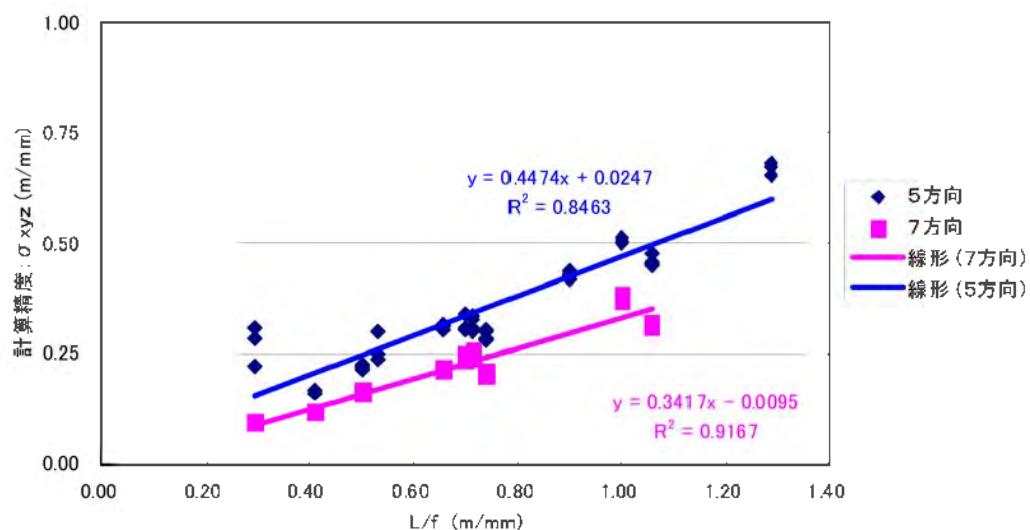
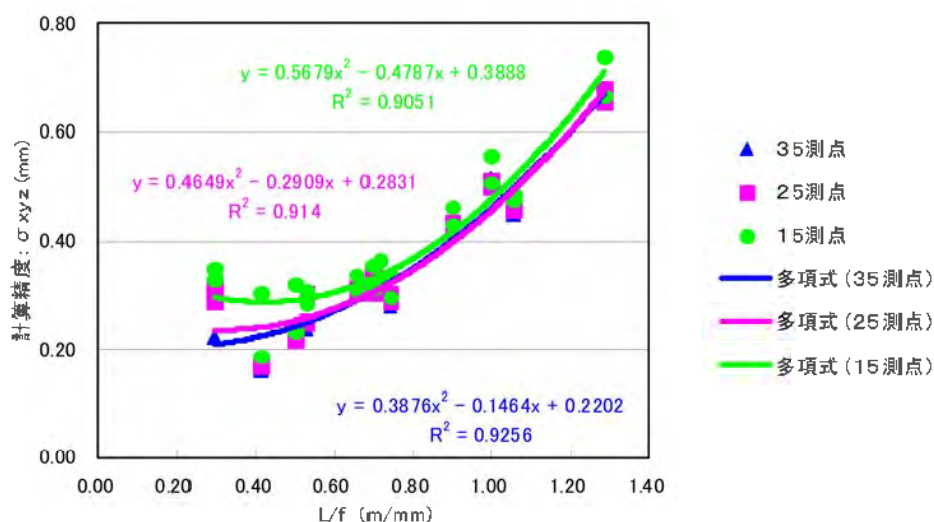


図 4.21 より、7方向から撮影したデータの解析結果の方が、L/f 値が増加しても計算精度（内的精度）の低下が少ないことがわかる。また、データのばらつきも7方向の結果よりも5方向の結果の方が大きくなっている。

次に、解析対象のターゲット数を、35 個、25 個、15 個と変化させたときの計算精度（内的精度）の変動を確認した。（図 4.21）

図 4.22 より、ターゲットの数が 35 点、25 点、15 点では、ターゲット点数が減少するごとに、 L/f 値の小さい方で計算精度（内的精度）が低下していることがわかる。これは、ターゲット数が少なくなると解析結果の精度が低下していくことを示している。

図4.22 ターゲット数・計算精度対比図（5方向）



15 点での解析については、 L/f 値が減少していくにつれて計算精度（内的精度）の向上する割合は低下していく。このことから、ターゲット数が少ない場合には、計算精度（内的精度）の非常に高い部分では、計算精度（内的精度）と L/f 値の関係は多項式で近似される可能性がある。

計算精度（内的精度）が特に高い部分でデータにばらつきがみられる。これは、スケール（基準尺）として2つのターゲットの間隔を用いているが、スケールの測定精度が高々 1 mm 以下程度であるため、0.2mm～0.3mm という高い計算精度（内的精度）に対してこの値を使用すると、逆に全体精度を低下させるためであると考えられる。

図4.23 計算精度(3方向)・L/f値相関図 (全データ)

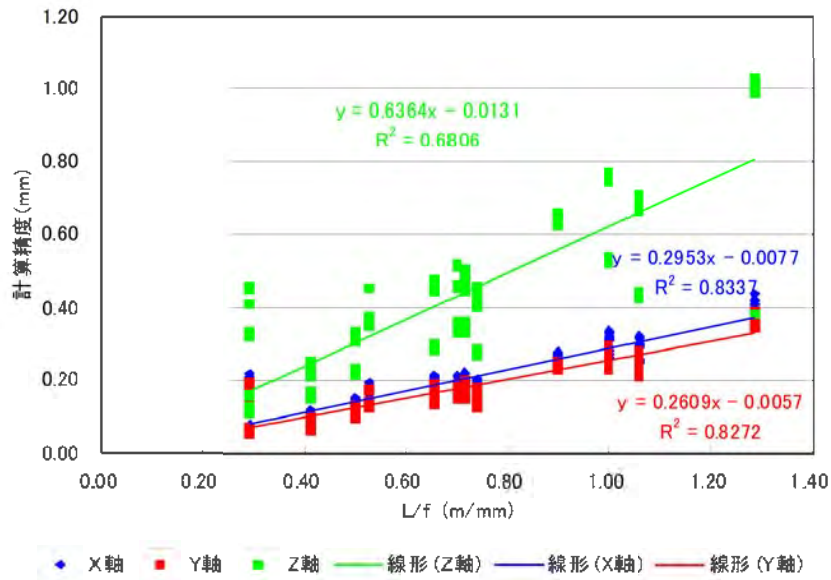


図 4.23 は、X Y Z 軸毎に計算精度（内的精度）と L / f 値についてまとめたものである。X Y 方向についてはほぼ同じ傾向であるが、Z 方向については、約半分の精度になっていることが確認できる。また、データのばらつきも Z 方向のもののほうが、他の 2 方向のものよりも大きくなっていることがわかる。

4. 8. 精密写真測量と鋼巻尺および光波測量との比較

精密写真測量システムの計測精度を比較検証するため、他の計測（測定）方法として鋼巻尺によるターゲット間距離の測定および光波測量（トータルステーション）による3次元座標取得を行い、精密写真測量で得られた結果と、光波測量の結果については2ターゲット間の距離を算出した。それぞれを距離データとして相互に比較を行った。

・検証項目

- ①鋼巻尺と光波測量との取得精度の比較
- ②鋼巻尺と精密写真測量との取得精度の比較
- ③光波測量と精密写真測量との取得精度の比較

鋼巻尺による測定及び光波測量状況は以下のとおりである。



図 4.24 鋼巻尺測定状況



図 4.25 光波測量状況

4. 8. 1. 鋼巻尺・光波測量との結果の比較

写真測量と光波測量および鋼巻尺との計測結果を以下にまとめた。

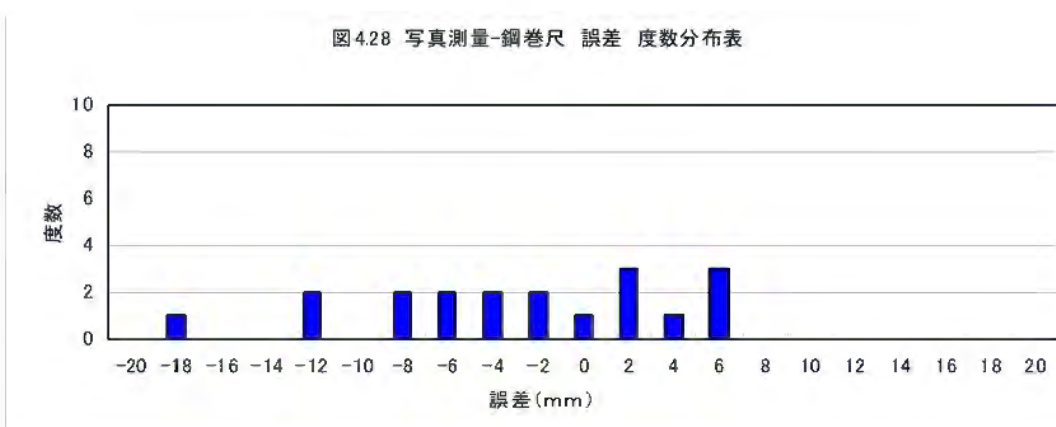
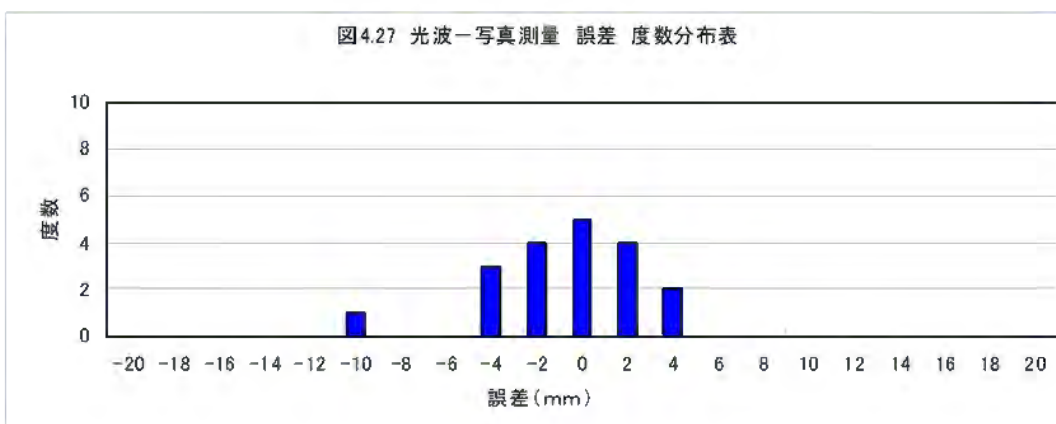
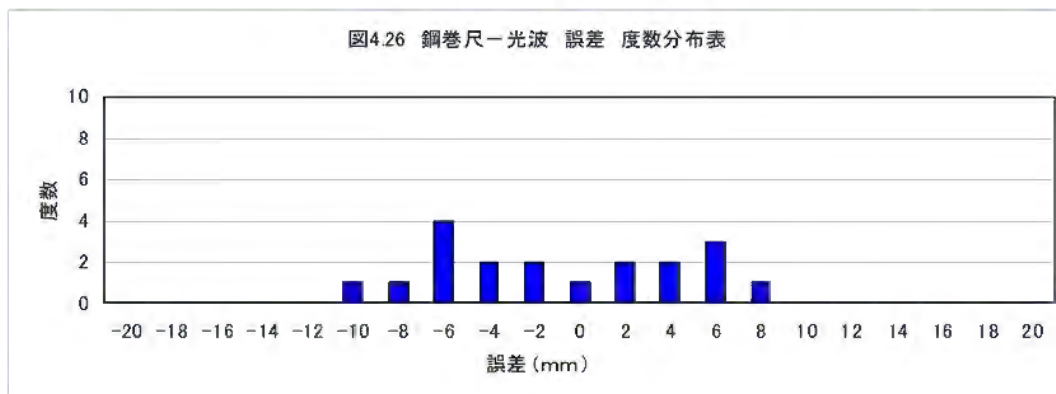
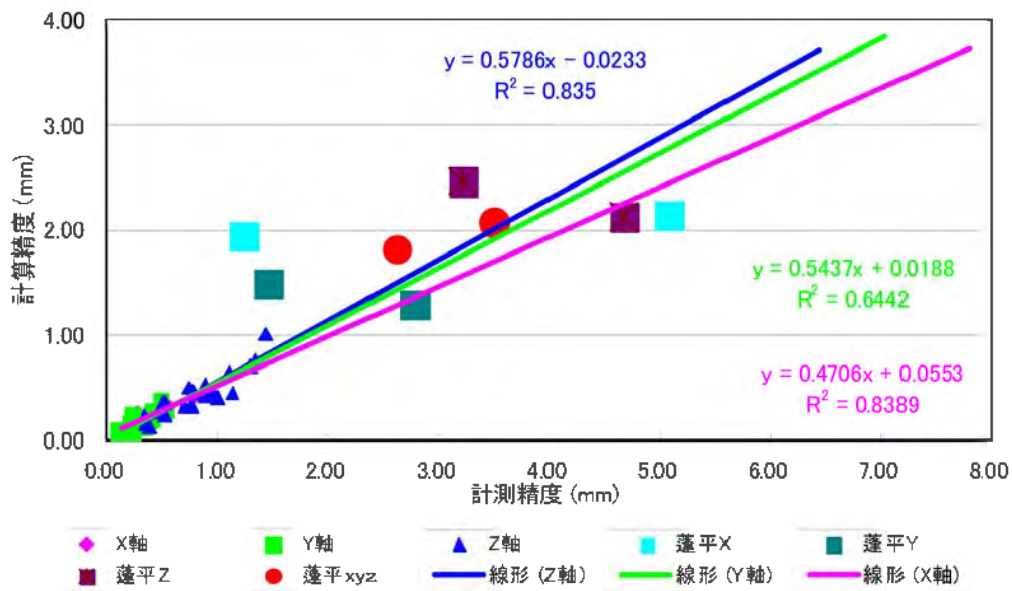


図 4.26～28 は、写真測量－光波測量－鋼巻尺のそれぞれの結果の差分（誤差）を示した代表的な例である。これらの結果から、写真測量と光波測量の結果はよく合致していることがわかる。

4. 9. 計測精度と計算精度（内的精度）の考察

図 4.29 は、フィールドテストの結果のうち変位量を計測した解析の組み合わせについて、計算精度（内的精度）と計測精度をすべてプロットしたものである。図から、2 回の解析の差分による結果（計測精度）は、計算精度（内的精度）と関係があり、ほぼ直線で近似することができることがわかる。

図 4.29 座標軸別 計測精度－計算精度相関図（全データ）



これに現地試験の結果（14方向での解析結果）を当てはめてみると、ほぼすべての値が、想定される範囲よりも精度のよい方向に分布していることがわかる。

さらに現地試験の結果の内、7方向での解析結果を重ね合わせると、次のようになる。

図4.30 座標軸別 計測精度－計算精度相関図（フィールド＋現場14方向、7方向データ）

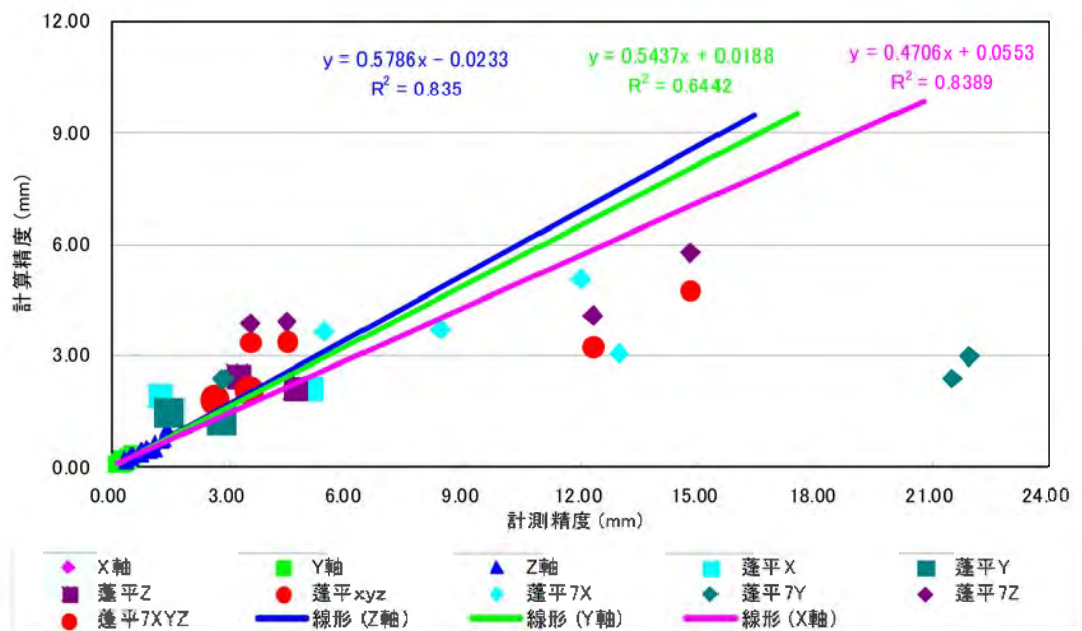
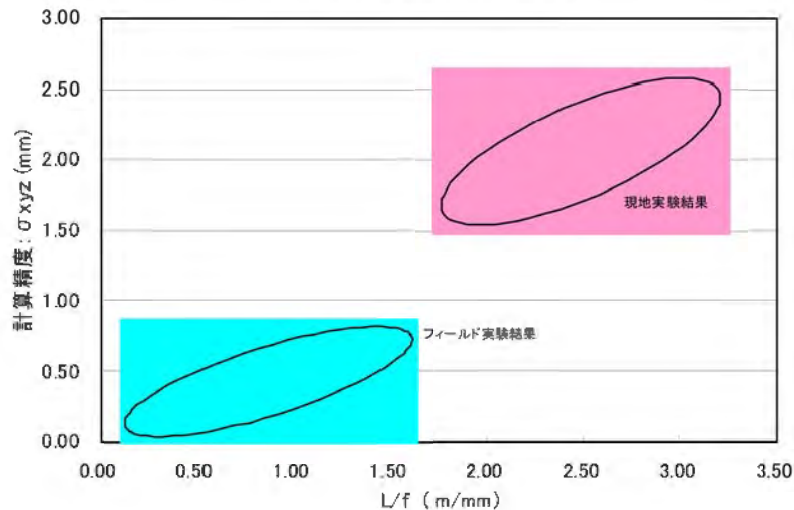


図 4.30 から、現地試験の 7 方向から撮影データでの解析結果では非常にばらつきが大きく、計測精度も計算精度に比べて低い方向に分布していたが、14 方向から撮影したデータで解析を行うことで、そのばらつきが小さくなり、計測精度も向上していることがわかる。

4. 10. L/f 値の評価

図4.31 計算精度・L/f値 相関図



フィールドおよび現地の実験結果から、 L （撮影距離）／ f （焦点距離）という値に基づいてデータの整理を行った。図 4.31 は、フィールド実験および現地実験（14 方向）の結果を計算精度（内的精度）と L/f 値であらわしたものである。現地実験のデータ数が少ないため、直線または多項式で近似することは難しいが、ほぼ正の相関があるように見られる。

4. 11. フィールド実験結果の総括

- フィールド実験の結果から、計算精度（内的精度）と計測精度の間には、高い相関があると考えられる、ということがわかった。
- L/f 値（撮影距離－焦点距離比）の値と、計算精度（内的精度）および計測精度との間にも関連があることが確認できた。
- ターゲット数、撮影枚数についても、その数量と精度との関係は、写真枚数またはターゲット点数が増加すると精度が高くなり、逆に減少すると精度は低くなるということがわかった。
- 現場における実際の変位についても、写真枚数を多くすることで、高精度の計測が可能であることが確認された。
- 光波測量の結果と比較して、写真測量の長さ方向の結果はほぼ同等の値を示していた。この結果から、今回の現地試験においては、写真測量の結果（14 方向の解析結果）は、光波測量とほぼ同等の精度を有していると考えてよい。

4. 1 2. カメラ機種、撮影方法の違いによる精度の比較

さらに、以下のような項目について、精度の検証実験を実施した。

- ①カメラ機種（画素数）と精度の関係
- ②画素枚数と精度の関係
- ③撮影角度と精度の関係
- ④カメラ回転角と精度の関係

以下にそれぞれの実験結果を示す。

撮影位置およびターゲット配置は以下の図のとおりである。

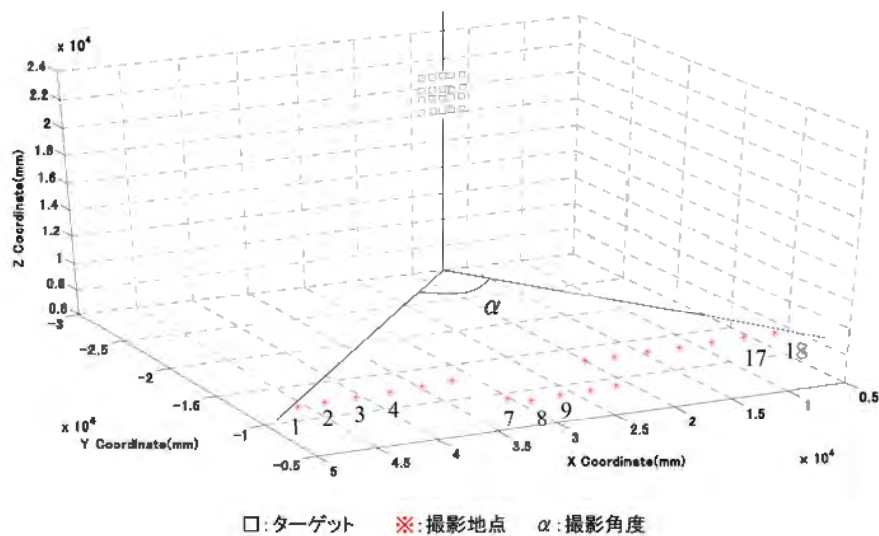


図 4.32 撮影位置図



図 4.33 ターゲット配置

①カメラ機種（画素数）と精度の関係

<検証方法>

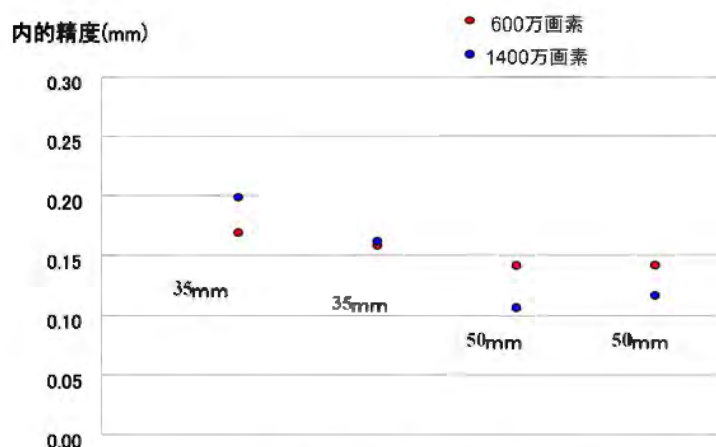
- 画素数 600 万画素および 1400 万画素のカメラを用いて撮影実験し精度を比較する。

<実験概要>

- ターゲット 20 個（以下同様）を配置した対象物を図に示す No.1-18 の計 18 箇所から撮影。なお、図は（水平方向・奥行き方向）の 2 次元に投影した状態であり、高さ方向を含めると撮影平均距離は 28.5m。図中の角度も 2 次元平面での値。（以下同様）
- 各撮影箇所においてカメラを 0, 90, 180, 270° の 4 方向に回転し、合計 72 枚の画像を用いて解析。なお、レンズ焦点距離は 35mm と 50mm の 2 種類を使用。

<検証結果>

- 2 種類のレンズ焦点距離に対して撮影日を変えて実験した 2 回の解析を示す。



カメラ画素数と精度の関係

図中の記号はレンズの焦点距離を表す。

図 4.34 カメラ画素数と精度の関係

<考察>

- 600 万画素の仕様によっても 1400 万画素と同等の精度は確保できる。

②画像枚数と精度の関係

<検証方法>

- ・ 撮影枚数を変えて撮影した画像を用いて精度を比較する.

<実験概要>

- ・ No.1・18 の各撮影箇所においてカメラを 0, 90, 180, 270° の 4 方向に回転し撮影. その中から, 表に示す撮影位置の画像を抽出して解析. なお, 解析にはターゲット手動認識のものと自動認識のものを使用した. レンズの焦点距離は 35mm.

撮影位置

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A		○		○		○		○		○		○		○		○		○
B	○		○		○		○		○		○		○		○		○	
C	○		○	○		○	○		○	○		○	○		○	○		○
D		○			○			○			○			○			○	
E	○				○				○				○				○	

<検証結果> ※ 図中:「手動認識」の A, B は同じ精度

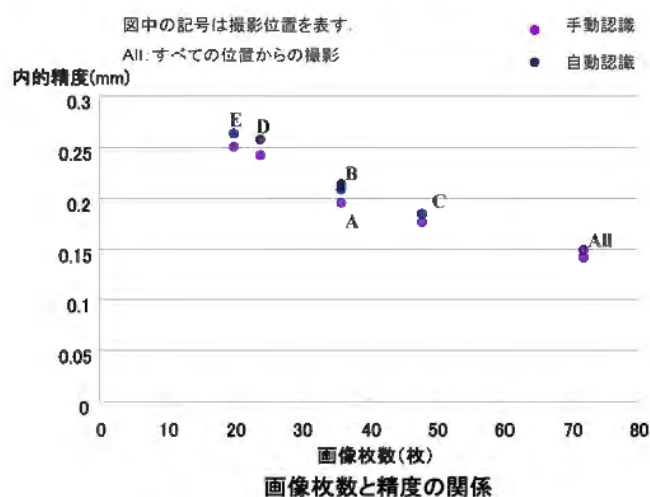


図 4.35 画像枚数と精度の関係

<考察>

- ・ 画像枚数 N に対して \sqrt{N} の関係で精度は向上する.

③撮影角度と精度の関係

<検証方法>

- ・ 撮影角度を変えて撮影した画像を用いて精度を比較する。

<実験概要>

- ・ No.1・18 の各撮影箇所においてカメラを 0, 90, 180, 270° の 4 方向に回転し撮影。その中から、表に示す撮影位置の画像を抽出して解析。
：枚数は角度の効果が表れやすいように 24 枚の画像を使用。
- ・ レンズ焦点距離は 35mm と 50mm の 2 種類を使用。
- ・ レンズ焦点距離 35mm の解析にはターゲット手動認識のものと自動認識のものを使用した。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A				○	○	○		○	○	○								
B			○	○	○				○	○	○							
C	○				○				○		○		○					
D	○				○									○		○		○
E	○	○	○								○	○	○					
左	○	○	○	○	○	○												
中央							○	○	○	○	○	○						
右													○	○	○	○	○	○

使用画像一覧

<検証結果> 横軸の角度は上記表における最左地点から最右地点までの角度を示す。

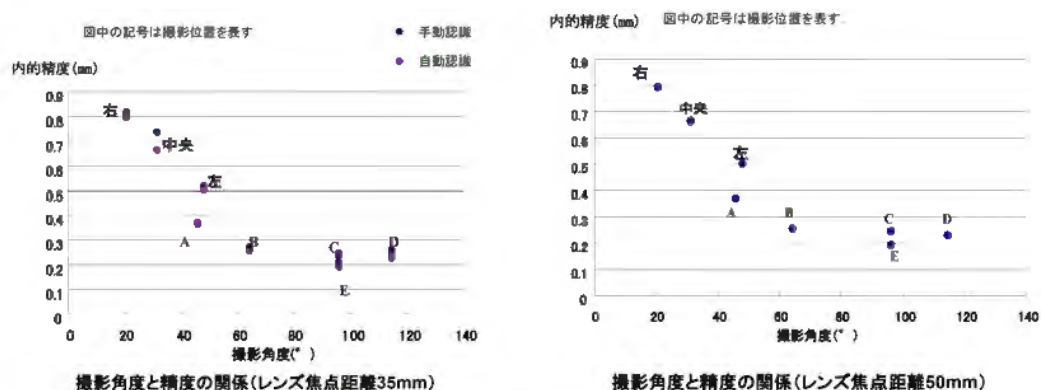


図 4.36 撮影角度と精度の関係

<考察>

- ・ 撮影角度が大きくなるほど精度は向上する傾向がある。(ネットワークの強化)ただし、ある程度の角度(実験では左右 50°)以上では角度をつけても精度への影響は小さい。
- ・ 撮影位置が対象物に対し左または右に偏ると精度が悪くなる傾向がある。

④カメラ回転角と精度の関係

<検証方法>

- ・ 撮影時のカメラの回転角を変えて撮影した画像を用いて精度を比較する.

<実験概要>

- ・ No.1・18 の各撮影箇所において表に示すように, カメラを回転させて撮影.
: カメラを回転させて撮影するのは, レンズ歪みの影響を取り除くのが目的.

実験では, 0° , 90° , 180° , 270° の各角度に固定したもの, およびそれら4回転の画像を用いたもの, さらに, 0° , 180° の2回転および 90° , 270° の2回転で撮影した結果を比較した.

- ・ 画像は各撮影箇所から1枚撮影した計18枚とした.
- ・ レンズ焦点距離は35mmを使用.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90
B	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180
C	90	270	90	270	90	270	90	270	90	270	90	270	90	270	90	270	90	270

設定角度一覧

<検証結果>

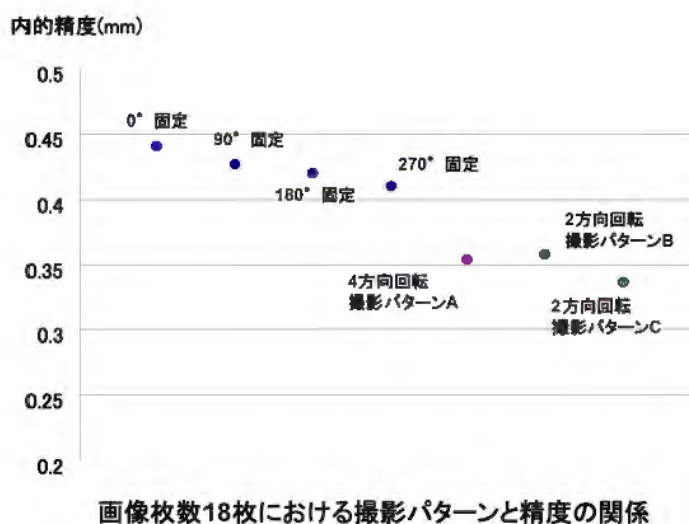


図 4.37 カメラの回転と精度の関係

<考察>

- ・ カメラを回転して撮影する方法を導入したほうが精度は向上する.
- ・ 0° , 180° の2方向の回転と4方向の回転の撮影方法は同等の精度になる.

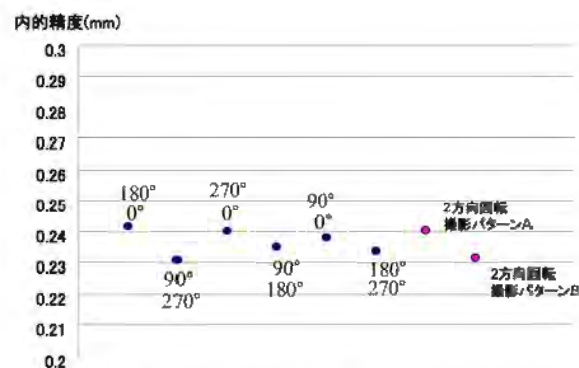
＜実験内容 2＞

- ・ カメラの 2 回転の方法によって精度に相違が生じるのか検証するために、 0° 、 90° 、 180° 、 270° のカメラの回転各の組み合わせによる精度の違いを検証した。
- ・ 組み合わせは、4 方向の中の 2 方向、および 2 方向の組み合わせを撮影箇所ごとに変えたものを抽出。画像枚数は 36 枚。レンズ焦点距離は 35mm。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270
B	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180

組合せ角度一覧

＜検証結果＞



画像枚数36枚における撮影パターンと精度の関係

図 4.38 カメラの回転と精度の関係(2)

＜考察＞

- ・ 2 方向の回転は、組み合わせによる精度の相違は生じない。

＜実験内容 3＞

- ・ 同じ画像枚数において，2 方向の回転による撮影で撮影位置を増やした場合と，同じ位置でカメラの回転を増やすことによって画像枚数を確保した場合での精度の相違は生じるのか，回転方法と撮影位置の組み合わせを変えて検証した．
- ・ 図に示す A は各撮影箇所において 4 方向にカメラを回転させて撮影．B は 0° ， 90° ， 180° の 3 方向に回転．C は 0° ， 180° の 2 方向の回転による撮影．
- ・ レンズ歪みは 35mm と 50mm のものを使用．

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A			○	○	○	○	○	○	○	○	○							
B	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
C	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

撮影位置一覧

＜検証結果＞

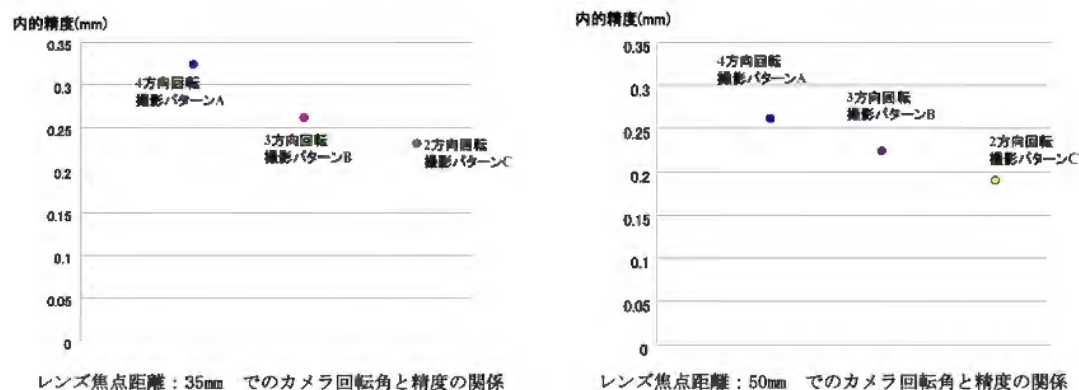


図 4.39 カメラの回転と精度の関係(3)

＜考察＞

- ・ カメラ回転角を 0° ， 180° にして，撮影地点を増やしたほうが精度向上には効果的である．（ネットワークの強化に相当する）

4. 13. 全体の精度と点の精度

これまで論議してきた内的精度とは、最小誤差であり、解析結果全体の精度としてとらえられる。しかし、計算結果の残差には、各ターゲット座標の XYZ についてそれぞれ残差量が存在する。以下に、個々のターゲットの 3 次元座標の残差についての検討を実施した。

下の図は、模擬斜面を作成し、撮影したものを、写真枚数を変えて解析したときの残差の分布を表したものである。上から順に、内的精度ごとに区分して低精度 1 件、中精度 2 件、高精度 2 件の結果を示している。

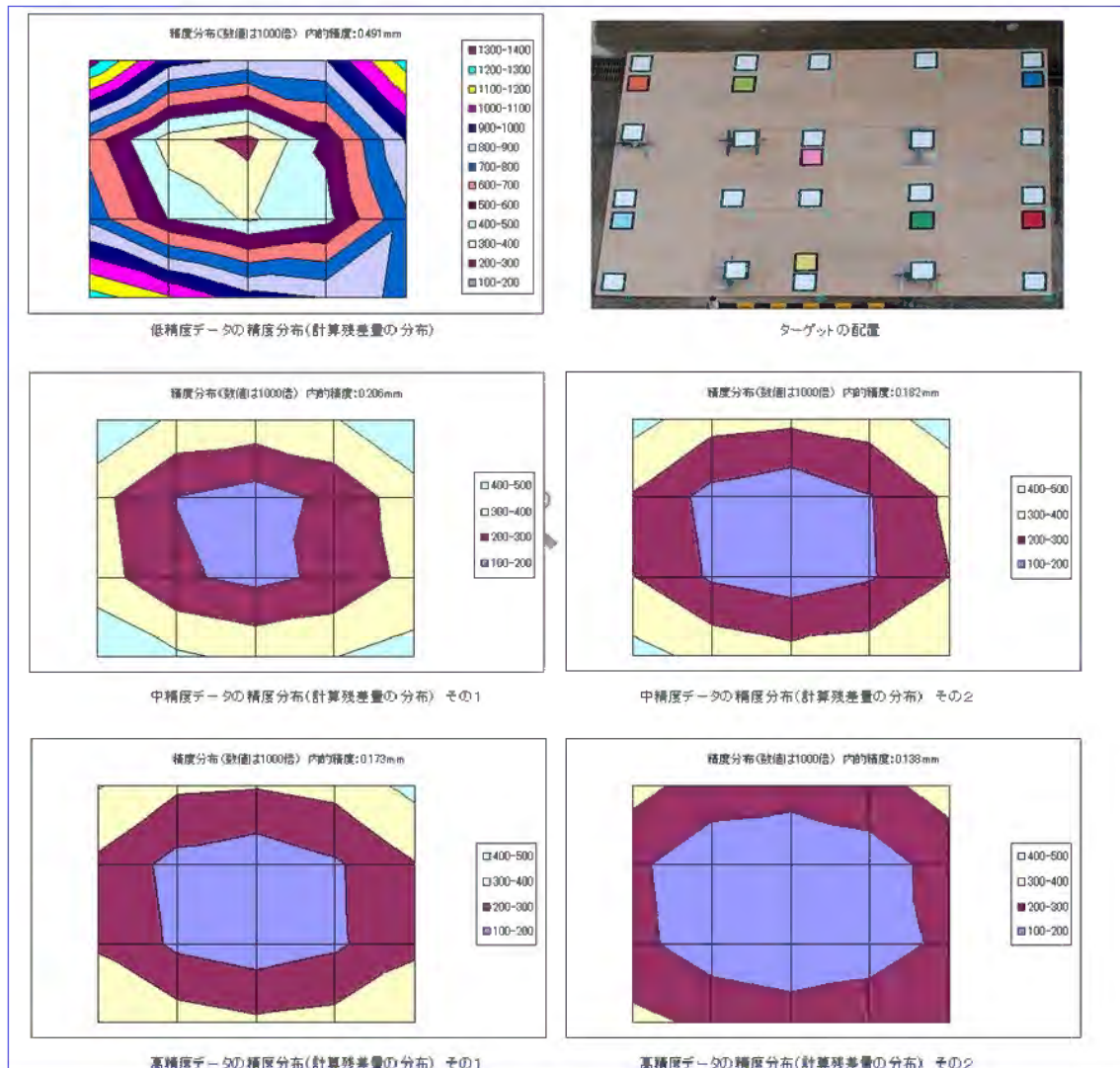


図 4.40 模擬斜面の解析結果の精度分布図

ここで、すべての結果について中央部の精度が高く、周辺に行くにいたがって精度が低下していることがわかる。また、低精度のものは、変化勾配が高く、高精度になるにしたがって、中心・周辺の差が低下していく。しかし中心部の

精度向上については限界があり、全体の精度が高くなると中心部の精度の高い領域が広がっていくことがわかる。以下に精度分布図の実データを示す。

表 4.4 精度分布表

精度分布表 (数値は1000倍 単位:mm ターゲット配置順)					
ID1 - ID15	1249	1113	944	897	764
ID6 - ID10	770	496	387	464	782
ID11 - ID15	660	346	267	522	907
ID16 - ID20	1356	945	868	898	1251

※内的精度 0.491mm

低精度データの精度分布(計算残差量の分布)

最大値
1356
最小値
267
最小最大比
5.08

精度分布表 (数値は1000倍 単位:mm ターゲット配置順)					
ID1 - ID15	496	377	362	391	510
ID6 - ID10	328	198	157	225	355
ID11 - ID15	345	216	175	219	331
ID16 - ID20	489	417	376	398	434

※内的精度 0.206mm

中精度データの精度分布(計算残差量の分布) その1

最大値
510
最小値
157
最小最大比
3.24

精度分布表 (数値は1000倍 単位:mm ターゲット配置順)					
ID1 - ID15	438	339	321	347	451
ID6 - ID10	290	168	130	194	320
ID11 - ID15	302	187	149	189	298
ID16 - ID20	432	371	335	350	390

※内的精度 0.182mm

中精度データの精度分布(計算残差量の分布) その2

最大値
451
最小値
130
最小最大比
3.47

精度分布表 (数値は1000倍 単位:mm ターゲット配置順)					
ID1 - ID15	407	317	306	334	430
ID6 - ID10	278	166	130	185	295
ID11 - ID15	287	181	145	182	279
ID16 - ID20	401	349	318	337	381

※内的精度 0.173mm

高精度データの精度分布(計算残差量の分布) その1

最大値
430
最小値
130
最小最大比
3.31

精度分布表 (数値は1000倍 単位:mm ターゲット配置順)					
ID1 - ID15	333	256	245	264	343
ID6 - ID10	220	131	108	150	241
ID11 - ID15	229	143	118	147	225
ID16 - ID20	325	281	254	269	297

※内的精度 0.138mm

高精度データの精度分布(計算残差量の分布) その2

最大値
343
最小値
108
最小最大比
3.16

また、実現場での解析結果でも平面に広がるターゲットを写真測量により計測する場合には同様の傾向が確認されている。これらから、2次元方向に広がりを持つデータをバンドル調整計算により解析した場合、周辺となるターゲットについては、中心部よりも3次元座標の精度が低下する傾向にあることが想定される。

この、精度の差が計算特性として現れるのかは不明であるが、周辺部の精度低下が発生しないようなターゲット配置、撮影方法等についての検討を行う必要がある。

4. 14. まとめと問題点

各種実験の結果から、精度の経験式の項で示したように、適切な大きさのターゲットを色々な方向から角度をつけて多くの写真を撮影することで、光波測量と同等程度の精度で計測を実施することが出来ることを確認した。さらに、従来は撮影時に1か所あたり光軸周りに90度ずつ回転させて4枚の写真を撮影していたが、1か所あたり2枚でも撮影位置を増やして枚数を同じにすることで同等程度の結果が得られることがわかった。この結果は、本章の初めに示したネットワーク強度との関連性が高いことを示唆している。

撮影距離(L)とレンズ焦点距離(f)の比(L/f)と計算精度の間には相関関係があり、比の値が小さくなると精度が高くなることも前述の精度の経験式から推定される結果と一致している。また、経験として中心部と周辺部の精度については、周辺部の精度が低下する傾向にあるという認識であったが、実験の結果もそれを裏付けるものであった。

フィールド実験の結果を踏まえて実際の現場における計測の精度を考えた場合、自然地形を相手にする計測であるため、特定の機材や撮影方法により、確実に高精度で実施できるという決定的なものは存在せず、撮影位置とターゲットまでの距離、ターゲットの配置、現場の地形等により、100mあたり何ミリというように一意の定量値として決定することができないことは明らかである。このため、計測計画を立案しても、現場に実際にターゲットを配置し、撮影して解析をしないと、その環境でどの程度の計測精度(内的精度)が出せるのかを判定できない。また解析結果についても、それが十分に満足できるものなのか、撮影枚数・撮影位置を追加して計測することで、さらに精度を上げることが出来るのかを知るための指標もない。

のり面のモニタリングを適切にかつ確実に実行するためには、作業者のスキルによらず、立案された計測計画に対して計測した結果を評価するための機能

は必要不可欠である。計画位置から撮影したターゲット配置を擬似的に画像データとして生成し、ターゲットのマーキングをシミュレートし、解析計算を行って精度の推定ができるものが現場の切実な要求として求められている。

また、経験的にも、今回の試験結果からも、計測する領域の中心と周辺で精度が異なることが認識されている。計測精度のばらつきを出来るだけ低減させるための現場条件に応じた理想的なターゲット配置については、さらに検討が必要である。

参考文献

- (1) 秋元圭一, 2002, 情報化施工のためのデジタル画像計測法に関する研究, 京都大学大学院博士論文

第5章 精密写真測量による斜面モニタリング

5. 1. 概説

本章では、前章にて示した、精密写真測量（解析写真測量）の手法を、実際に道路のり面の計測と管理に適用させるための、管理基準方法、計測手順、必要材料等の検討を行い、実際の施工現場における計測結果例を示すことで、のり面計測における精密写真測量の実施状況を確認し、その際に発生する課題および問題点について示す。

5. 2. 精密写真測量によるのり面モニタリング

第1章でも示したが、日本全土を網羅する道路におけるのり面の総延長は長大な距離になる。開削施工中ののり面の変位計測や、大雨等による斜面崩壊（いわゆる上砂災害）での安全管理のための情報収集手段として、のり面のモニタリングは必要不可欠である。特に多数ののり面を、定期的な計測により、ゆるやかではあるが管理基準値を超える変形があることが検出できれば、そのエリアを重点観測ポイントとして、変位計、傾斜計といった高価な定置式の観測装置を導入することが可能であり、限られた予算を有効に使用することができる。デジタルカメラによる写真撮影により計測できる精密写真測量は早期の異常発見手段として期待できる。

以下に、道路のり面の中でも比較的良好に整備されている高速道路ののり面のモニタリング業務への精密写真測量の適用と位置づけについて示す。

5. 2. 1. 道路「のり面」のモニタリング業務

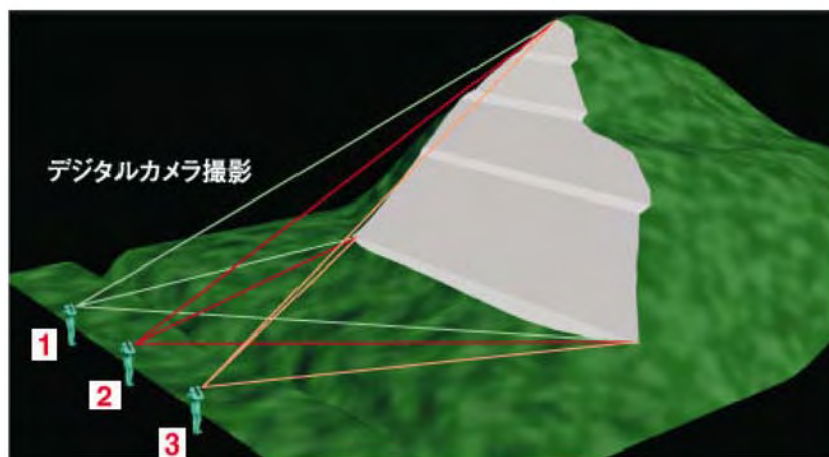


図 5.1 撮影イメージ図

「のり面」計測時の撮影イメージを上図に示す。工業計測と異なり、自然状態で撮影するため、撮影位置は水平方向には比較的展開しやすいが、垂直方向の多様性を持たせることが難しい。

高速道路総合技術研究所（旧日本道路公団試験研究所）では、定期的な「のり面」モニタリング手段として精密写真測量による変位計測を標準手法として運用マニュアル作成し適用しようとしている。このマニュアルを配布することにより、測量技術者以外の人間が、スキルに関係なく計測→解析→評価までの手順を実施できるようなシステムを目標としている。

5. 2. 2. のり面点検概要

のり面点検・調査の概要は、次のとおりである。

①点検対象のり面の現状把握と既往災害の分析

建設時からの崩壊履歴や対策工および点検結果に基づいてのり面の現状把握を行い、重要なり面を選定する。

②点検の実施および判定

点検の着眼点を定められた（分類された）適切頻度で点検し、個々の損傷および安定度の変更の要否を判定する。また、損傷に対しては適切な補修を提案する。

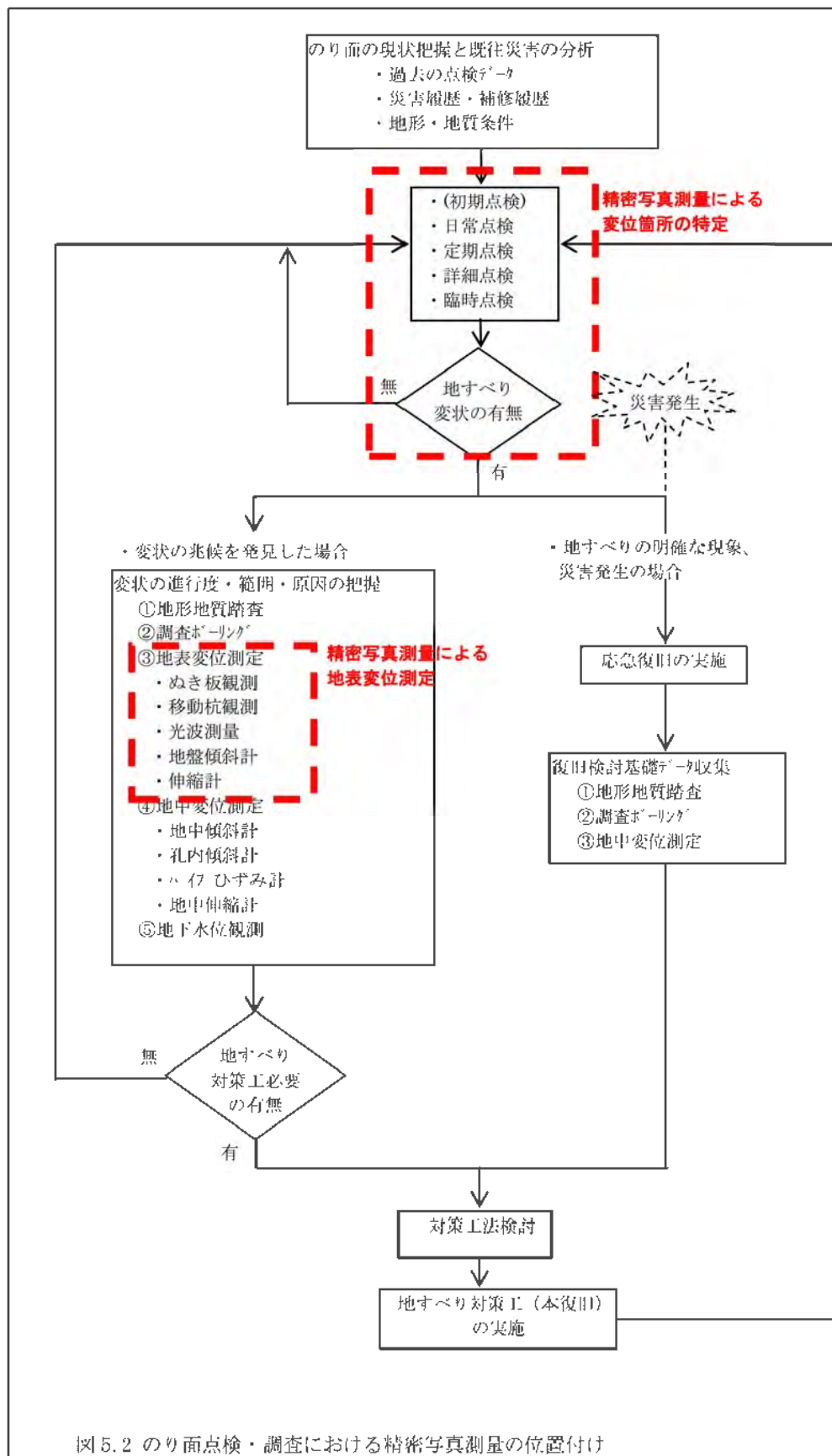
③のり面変状対策調査の実施

地すべり変状兆候を発見した場合には、変状の進行度、変状の範囲および発生原因などを把握するため、地形地質踏査、地表変位測定、調査ボーリング、地中変位測定、地下水位観測等を行う。

点検および計測における精密写真測量の位置付けとしては、表 5.1 に示す内容が考えられ、点検業務フローにおける位置付けを図 5.2 に示す。⁽¹⁾

表 5.1 点検および計測における精密写真測量の位置付け

項 目	位置付け・代替等の内容
のり面点検	<ul style="list-style-type: none"> ・従来の点検は、のり面の変位の兆候（現象）として現れる変状のみを点検（把握）するものであるが（しかできなかったが）、精密写真測量においては、直接のり面（表面）の変位量（変動、移動）としての把握（計測）が可能となる。 ・精密写真測量においては、のり面の表面変位が「面」として捉えることができるため、のり全体の変位（崩壊）形態の推測が容易となる。
のり面変位計測	<ul style="list-style-type: none"> ・精密写真測量システムの処理時間を短縮することにより、光波測量（変位計測）の代替として、現地での作業性ならびにデータ処理時間の改善を図るもの。



5. 2. 3. のり面モニタリングの実施時期

精密写真測量を用いたのり面点検・地表面変位計測で想定される実施時期、内容および対象箇所は、表 5.2 のとおりである。

この中では、主に定期点検時において、精密写真測量を用いた計測を同時に実施し、のり面の変位を定期的・継続的に監視することにより、従来点検での変位・変状箇所の見落とし等を補完する点検業務の高度化・効率化につながるものと考えられる。

表 5.2 点検・計測の実施時期、内容、対象箇所

項目		内容	対象のり面
のり面 点検	初期点検	・通常の初期点検に合わせて実施し、今後の点検(計測)比較のための初期値とする。	・建設の段階で崩壊や変状がみられた箇所 ・変状が危惧される箇所（長大のり面等）
	日常点検	・定期点検等において、変位や変状が認められた場合に、頻度を上げて実施する。	・事務所管内における重要点検対象箇所の中で、変位や変状が認められる箇所
	定期点検	・通常の定期点検に合わせて年 2 回程度（雪解け・台風時期等）の頻度で実施する。	・事務所管内における重要点検対象箇所
	詳細点検	・通常の詳細点検の頻度（供用後 2 年、1 回/5 年、10 年）および道路防災総点検の頻度(1 回/5 年)に合わせて実施する。	・事務所管内における重要点検対象箇所 ・第三者被害が想定される長大のり面等
	臨時点検	・豪雨や地震発生直後等、必要に応じて実施する。(通行止等の解除判断への使用は、時間的制約から困難)	・事務所管内における重要点検対象箇所
のり面 地表面変位計測		・日常・定期点検等において、変位や変状の進行が認められ、崩壊が危惧される場合に、他の動態観測機器と合わせて計測を行う。(※光波測量の代替)	・変位や変状の進行が認められ、崩壊が危惧される箇所

5. 2. 4. 点検方法の比較

精密写真測量による点検と従来の徒歩による点検および航空撮影点検の特徴を、表 5.3 に比較した。

表 5.3 精密写真測量と従来点検、航空撮影点検との比較

項目	従来点検	精密写真測量	航空撮影点検
位置付け	<ul style="list-style-type: none"> ・安全で快適な交通確保と第三者被害の未然防止のため、構造物点検要領に定められた頻度および方法により、構造物の状況を的確に把握し、計画的な補修の基礎資料を得るもの。 	<ul style="list-style-type: none"> ・従来の目視点検では変位の兆候（現象）として確認していた変状を、移動量として捉え、作業性・精度を改善するもの（簡易計測としての位置付け） ・変位がないことの確認によるのり面安定の評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・主に従来の遠方目視点検を補完（視点方向の違い）し、作業性を改善するもの ・ハイビジョンデジタル画像であれば、のり面の正面からの高精度のデジタル画像が得られ、ターゲットを設置しておけば、精密写真測量が可能
点検対象	<ul style="list-style-type: none"> ・一般のり面（植生のり面） ・特殊のり面 ・メーソンリー ・コンクリート擁壁 ・補強上壁・軽量盛土 ・グラウンドアンカー ・切上のり面後背斜面 ・上石流 ・のり面排水施設 	<ul style="list-style-type: none"> ・一般のり面（植生のり面） ・特殊のり面 ・メーソンリー ・コンクリート擁壁 ・補強上壁・軽量盛土 ・切上のり面後背斜面 ・転石・岩盤斜面 ・アンカーヘッドの変形量など 	<ul style="list-style-type: none"> ・一般のり面（植生のり面）（植生状況の把握・損傷の発見は困難） ・特殊のり面 ・メーソンリー ・コンクリート擁壁 ・切上のり面後背斜面 ・のり面排水施設（小段排水を除く） ・のり面周辺地山の状況
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・近接目視により、詳細な変状の把握が可能 ・迅速な対応が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・面的な変位（移動量）の把握が可能 ・点検（計測）精度が比較的高く均一性がある ・点検が比較的迅速 ・データの正確な再現性、経時変化の比較が容易 ・進入困難箇所の点検が可能（ターゲット計測） ・点検作業の労力が比較的少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・点検の迅速性（短時間に多くの撮影が可能） ・点検データの均一性 ・データの再現性、経時変化の比較が容易 ・進入困難箇所の点検を補完（上空からの遠方目視） ・点検作業の労力が比較的少ない
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・個別損傷の変位の測定、のり面全体変位の把握は不能 ・点検者により点検精度がばらつく ・植生が繁茂している場合、植生状況のみの確認となる（地表面の確認は困難） ・長大のり面等の場合、作業の労力が大きい ・データの正確な再現性、経時変化の比較に劣る ・進入困難箇所は遠方目視のみの点検となる 	<ul style="list-style-type: none"> ・変状やのり面排水施設の閉塞等の確認は不能 ・ターゲットの視認性確保のための草刈り等のメンテナンスが必要 ・データ解析にあたっては、写真測量の基本知識が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・変位の把握は不能 ・撮影角度や植生等で影となる箇所の把握が困難 ・小段排水施設の確認が不能 ・植生が繁茂している場合、植生状況のみの確認となる（地表面の確認は困難） ・航空機を用いるため、気象条件に左右される ・迅速な航空機の手配が不能

5. 2. 5. 光波測量との比較

精密写真測量による地表面変位計測と光波測量の特徴を、表 5.4 に整理した。光波測量との大きな違いは、光波測量では基準点が必要となり、常に機器の自己位置を特定させる必要がある点である。また、計測に際しては、機器を堅牢に固定する必要があるが、精密写真測量のように手持ちでの撮影というわけにはいかない。

ただし、精密写真測量では、距離に比例して大きなターゲットが必要となり、ターゲットの製作および現地での固定方法が問題となる場合があるが、最初に設置した後は、恒久的に使用できるため、斜面モニタリングのように繰り返し計測においては、2 回目以降は精密写真測量の方が手軽に実行できる。

表 5.4 精密写真測量と光波測量との比較

項目	精密写真測量	光波測量
位置付け	・ 光波測量（地表面変位計測）の代替として、現地での作業性ならびにデータ処理時間の改善を図るもの。	・ 地表面変位計測の 1 手法として、設置した測点の移動量を光波測量により計測するもの。
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・ 面的な変位（移動量）の把握が可能 ・ 現地撮影作業が比較的容易 ・ データ解析までの処理時間が比較的短い（1 フロックを半日程度で想定） ・ 進入困難箇所の点検が可能（ノンターゲット計測） ・ 今回システムにおいては、撮影、解析に高度な知識を必要としない ・ 必ずしも、基準点の設置を必要としない 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 測点（鉋、杭）の設置が比較的容易で安価 ・ 比較的高精度の計測が可能
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・ 光波測量用の測点（鉋）と比較し、大掛かりな測点の設置が必要 ・ ノンターゲット（又は必要最小限のターゲットとの併用） ・ 光波測量と比較し、Z 方向の精度が劣る 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現地測量作業の労力が比較的大きい ・ データの処理に比較的時間がかかる ・ 基準点の設置が必要 ・ 進入困難箇所の測量は不能 ・ 計測に測量技術・知識が必要

5. 2. 6. 従来計測における管理基準

クラックや段差などの変形量（伸縮計や地中変位計により測定）は、土質地質調査要領などに提案されている。これらの管理基準を以下に示す。(1)(2)(3)

表 5.5 維持管理段階の管理基準値の例

計測機器	管理基準 の表記法	対 応 区 分			
		点検・要注意 又は観測強化	対策の検討	警戒 応 急 対 策	嚴重警戒 ・通行止め
伸縮計	継続日数と その間の変 位速度	10mm 以上 /30 日	5～50mm/5 日	10～100 mm/日	100mm 以上/日
地中傾斜計					
光波測距儀					
孔内傾斜計	継続日数と その間の変 位速度	1mm 以上 /10 日	5～50mm/5 日		
			①斜面内・頭部の 亀裂・陥没穴 ②耕地・道路の危 裂・陥没穴・ 段差 ③電柱・フェンスの変 状 ④切土面に現れ た流れ版状の 断層面又はす べり面 ⑤のり面からの 湧水	①斜面や崖面からの岩石片 や砂が連続的に落下 ②異常な湧水の濁りと湧水 量の変化。湧水が急に止 まったり、濁ったり、沢 の流量が変動 ③線が大きくゆれ動く ④地盤の振動や地鳴りが発 生 ⑤風もないのに樹木の枝葉 が擦れ合って音を出したり、 立ち木の根切り音が する。	

（土質地質調査要領（平成4年4月 日本道路公団））

（（財）高速道路調査会「地すべり危険地における動態観測施工に関する研究その3」日本道路公団委託（S63/2））

表 5.6 伸縮計による地盤伸縮の程度

変動ランク	日変位量 (mm)	累積変位量 (mm/月)	一方向への累積 傾向	活動性当
変動 a	1mm 以上	10mm 以上	顕著	活発に運動中
変動 b	0.1～1mm	2～10mm	やや顕著	緩慢に運動中
変動 c	0.02～0.1mm	0.5～2mm	ややあり	継続観測が必要
変動 d	0.1mm 以上	なし (断続変動)	なし	局所的な地盤変 動、その他

注) 日変位量と累積変位量をあわせて変動ランクを考慮する。

(道路土工・のり面・斜面安定工指針(11/3 日本道路協会))

上記の例を参考に、精密写真測量においても「10mm以上の変位を異常として判定する」という基準値を目標に設定した。

5. 2. 7. ターゲットの選定

工業計測分野での近接写真測量においては、表面にガラスビーズを貼り付けたレトロターゲットと呼ばれる再帰反射（光を照射方向にのみ反射する）ターゲットが多く用いられている。⁽⁴⁾

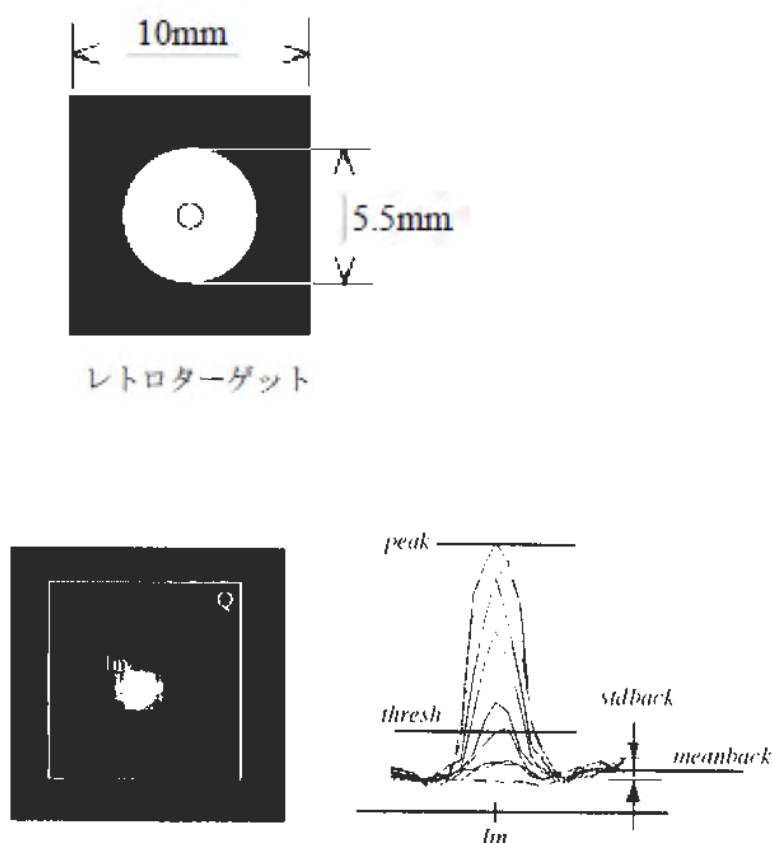


図 5.2 レトロターゲット、画像拡大図および明度信号強度分布

反射ターゲットを用いるメリットは、レンズを絞ってストロボ撮影を行うことにより、ターゲットのみがはっきりと写った画像を取得することができ、ソフトウェアによるターゲットの中心決定精度が向上するという点が上げられる。しかし、現場に多数のターゲットがあった場合、撮影された画像から個々のターゲットを識別（IDの判別）することが難しく、ターゲットの画像座標を読み取る際に問題となる。

図 5.3 は、レトロターゲットによる撮影画像例である。

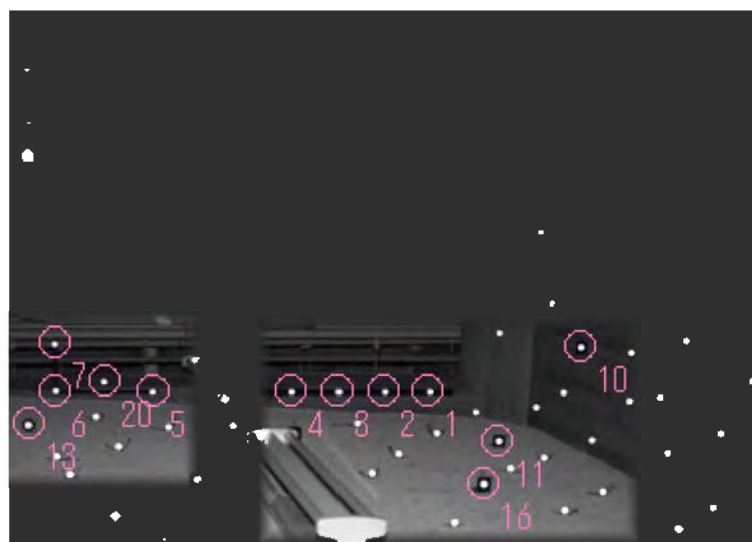


図 5.3 レトロターゲットによる撮影画像

ストロボ撮影の必要なレトロターゲットの利用は撮影時刻を選ばないというメリットがあるが、供用中の高速道路の直近でストロボ撮影を実施することは、場合によっては事故の誘発要因ともなりかねず、安全管理上望ましくない。また、再帰反射ターゲットは 50mm 以上の大きなサイズを製造する場合コストが高くなる一方で、表面にガラスビーズを貼付しているため汚れやほこり等により反射効率が著しく低下するという問題がある。遠距離からの計測を特徴とする精密写真測量が、計測前にすべてのターゲットを清掃していたのでは、そのメリットがなくなってしまう。

このため、レトロターゲットではなく白黒の高コントラストのターゲットを採用することとし、以下の様に規定した。

①ターゲットの大きさや形状

ターゲットは、黒枠に囲まれた白色とする。ターゲットの形は、「正方形・塗装」タイプの使用を標準しターゲットサイズは次の 2 種類とする。

表 5.7 ターゲット基準サイズ

種別	ターゲット内寸	縁黒ペイント幅	全体サイズ
A	300mm	75mm	450mm角
B	450mm	100mm	650mm角

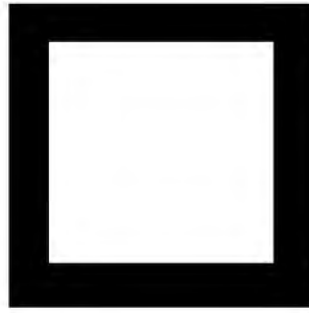


図 5.4 ターゲットの形状

②ターゲットサイズを選択方法

ターゲットの大きさは、撮影位置を勘案し、撮影距離、焦点距離等により決定する。画像上のターゲットのサイズは10画素以上が望ましいとされている。ターゲットの大きさの計算例を以下に示す。

<ケースA> 撮影距離 100m, 焦点距離 18 mmで 300mm 角ターゲットを使用した場合の計算例

図 5.5 より、次式の比例関係が成り立つ。

$$L/X = f/X'$$

ただし、撮影距離 L 、ターゲット寸法 X

焦点距離 f 、画像面のターゲット寸法 X'

$$\therefore 100 \text{ m} \times 1000 / 300 \text{ mm} = 18 \text{ mm} / X'$$

$$\therefore X' = 54 \text{ } \mu\text{m}$$

600 万画素デジタルカメラの 1 画素 = $7.9 \text{ } \mu\text{m}$ であることから、画像面のターゲット画素数 p は、

$$p = X' / S = 54 / 7.9 = 6.84 \text{ 画素} < 10 \text{ 画素}$$

となり、焦点距離 18 mm のレンズは適切ではない。

<ケースB> 撮影距離 100m, 焦点距離 35 mmで 300mm 角ターゲットを使用した場合の計算例

ケースAと同様の計算より、画像面のターゲット画素数 p は、

$$p = X' / S = 105 / 7.9 = 13.29 \text{ 画素} > 10 \text{ 画素}$$

よって、 $f=35 \text{ mm}$ のレンズを使用すれば、ターゲットの大きさは、300mm 角で適

当ということがわかる。

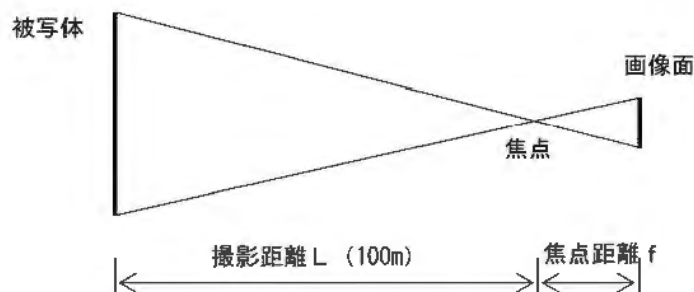


図 5.5 撮影距離と焦点距離の関係

表 5.8 600 万画素カメラの画面サイズ・撮影角・ターゲット内の画素数の関係

レンズ 焦点距離 f (mm)	CCDサイズ S (μm)	撮影距離 L (m)	実際のター ゲット寸法 X (mm)	画像上の ターゲット寸 法 X' (μm)	画像上の ターゲット画 素数 p (ピクセル)	撮影画角(°)		全体画面の大きさ (m)	
						水平	垂直	水平 H	垂直 V
135	7.9	100	300	405	51.27	10.03	6.61	18	12
85	7.9	100	300	255	32.28	15.87	10.49	28	18
50	7.9	100	300	150	18.99	26.67	17.73	47	31
35	7.9	100	300	105	13.29	37.41	25.13	68	45
18	7.9	100	300	54	6.84	66.72	48.86	132	91

③ターゲット材質の選択方法

ターゲットの材質についてはさびによる劣化や紫外線劣化等を考慮して、表 5.9 および図 5.6 に示すアルミ複合板に塗装したものを使用することとした。

表 5.9 計測現場におけるターゲット仕様

	原材料名	内 容
画材	アルミニウム	材質：A3004 (JIS H4000)
芯材	ポリエチレン	発泡ポリエチレン樹脂
塗料	プライマー トップコート	エポキシ系樹脂 ポリエステル系樹脂

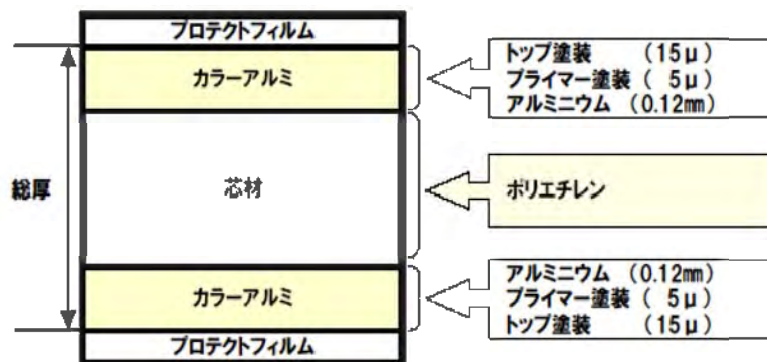


図 5.6 ターゲット材の断面

5. 2. 8. 解析結果の管理基準

先に示したとおり、斜面モニタリングの管理基準値として、計測誤差による余裕をもたせて「10 mm以上の変位を異常として判定する」という方向性を定めた。精密写真測量の解析結果である内的精度（計算精度）が標準偏差であらわされているため、 $\pm 3\sigma$ の確率分布範囲で考慮すると、内的精度 3 mmを達成できれば上の条件に見合う計測が可能になる。

そこで、斜面モニタリングにおける精密写真測量による解析計算結果の評価は以下の値を基準値として実施することとした。

収束係数： ターゲットの画像上の中心座標をどの程度の精度で検出することができたかを示す数値（単位は画素[ピクセル]：標準偏差）

収束係数の目標値：0.2 以内

内的精度： 解析計算結果のターゲット 3 次元座標がどの程度の計算誤差をもって求めることができたかを示す数値である。計算精度と呼ぶ場合もある。（単位はmm：標準偏差）

内的精度の目標値：3 mm以内

収束係数は、ターゲットの画面上での大きさ、撮影された画像の鮮明さ、ターゲットの汚れ等により、その値が大きくなる。収束係数が小さいことは、ターゲットの読取が精度よく実施されたことを示している。

収束係数が 0.2 を大きく超える場合には、撮影位置、使用レンズ、ターゲットの大きさについての再検討が必要になる。収束係数が 0.2 以下であった場合、画像上の中心位置の検出は精度良く実施できたことを示すが、写真枚数と撮影位置

により内的精度の向上には直接つながらない場合があるが、撮影位置、枚数を増加させることで内的精度の向上が期待できる。しかし、収束係数があまり小さくならない場合には、写真枚数を増やしても内的精度の向上は期待できない。

表 5.10 解析結果の評価基準

		収束係数	
		0.2以下	0.2を超える
内的精度	3mm以下	精度良く解析を実施できた	特定の画像またはターゲットに不良がある (精度向上の可能性アリ)
	3mmを超える	写真枚数または撮影位置の不足が推定される (精度向上の可能性アリ)	レンズ・撮影位置・ターゲットサイズを見直し再計画する必要がある

5. 3. 複数回計測の比較と管理

1 回ごとの計測結果の評価については、一定の基準を設定したが、モニタリングの最終目的である変位を求めるために、複数回の計測結果を比較する必要がある。以下に、2 種類の結果表記方法を提示する。

5. 3. 1. 変移量図

変移量図は2回の解析結果の3次元座標値の差分をベクトル量として表示するものである。バンドル調整計算では、全ての計測点の座標を固定しないフリーネット計算を行っている。このため、2回の解析計算毎に極微小ではあるが座標軸の方向・原点が異なっている可能性がある。このため、2回の解析結果を比較する際に、1回目の解析結果に対して2回目の解析結果を重ね合わせる処理が必要となる。

本論文では、計測区域全体が一様に変位するという可能性を排除し、計測区域内の一部が変位すると想定している。ここで、変移量とは数ミリメートルから数センチメートルを想定すると、2回の計測で、すべての計測点を比較し、その差分量が最小になるように2回目の座標変換を実施することで、残差量を変移量として判定することができる。

2回の計測結果を重ね合わせるためには、次の3つの操作を必要とする。⁽⁴⁾

- ①伸縮（スケール調整）
- ②平行移動
- ③回転

①スケール調整と②平行移動は以下の手順により、一度に調整できる。

それぞれの形状において、各点の重心からの距離の2乗和の平方根を計算し、その比をもってスケール比とする。

基準側の重心座標 $x_g = (\sum x_i) / n$

モデル側の重心座標 $y_g = (\sum y_i) / n$

そしてこれらを原点として計った座標値をそれぞれ改めて x_i , y_i と書く。

すなわち

$$x_i = x_i - x_g, \quad y_i = y_i - y_g \quad i=1, \dots, n \quad (2)$$

である。

スケール比 s は

$$s = \sqrt{\sum \text{norm}(\mathbf{x}_i)^2 / \sum \text{norm}(\mathbf{y}_i)^2} \quad (3)$$

で与えられる。 $\sqrt{}$ は平方根を norm はベクトルのノルムを表す。
この比をモデル座標にかけて、スケールを合わせ、あらためて \mathbf{y}_i とおく。
すなわち

$$\mathbf{y}_i = s * \mathbf{y}_i, \quad i=1, \dots, n \quad (4)$$

である。これで、重心点の平行移動とスケールの調整が行われる。

次に③座標軸の回転調整を実施する。

\mathbf{y}_i に対して回転行列 M で表される回転を施して \mathbf{x}_i に重ね合わせる。このときの残差 \mathbf{v}_i の 2 乗和が最小になるような M を求める。

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_i - M * \mathbf{y}_i \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E &= \mathbf{v}' * \mathbf{v} = \sum \mathbf{v}_i' * \mathbf{v}_i = \sum (\mathbf{x}_i - M * \mathbf{y}_i)' * (\mathbf{x}_i - M * \mathbf{y}_i) \\ &= \sum \mathbf{x}_i' * \mathbf{x}_i - 2 \sum \mathbf{x}_i' * M * \mathbf{y}_i + \sum \mathbf{y}_i' * \mathbf{y}_i \quad (6) \end{aligned}$$

ここで M は直交行列だから $M' * M = I$ となることを用いた。

第 1 項と第 3 項は一定だから、 E を最小にするには $\sum \mathbf{x}_i' * M * \mathbf{y}_i$ を最大にすればよい。

$$\begin{aligned} E1 &= \sum \mathbf{x}_i' * M * \mathbf{y}_i \\ &= \sum \text{trace} \{ \mathbf{x}_i * (M * \mathbf{y}_i)' \} \\ &= \text{trace} \{ \left(\sum \mathbf{x}_i * \mathbf{y}_i' \right) * M' \} \\ &= \text{trace} \{ N * M' \} \end{aligned}$$

ただしここで $N = \sum \mathbf{x}_i * \mathbf{y}_i'$ とおいた。

この 3×3 行列 N を $N = U * S * V'$ と特異値分解する。 U, V は直交行列、 S は特異値を対角項に持つ対角行列である。

$$\begin{aligned} E1 &= \text{trace} \{ U * S * V' * M' \} \\ &= \text{trace} \{ V' * M' * U * S \} \end{aligned}$$

trace は、積が実行できるならば行列の積の順序に無関係であることを用いた。
これが最大になるのは $V' * M' * U = I$ となるときであるから

$$M' = V * U' \quad \therefore M = U * V' \quad (7)$$

として M が計算できる。

図 5.7 に変移量図（ベクトル図）のサンプルを示す。

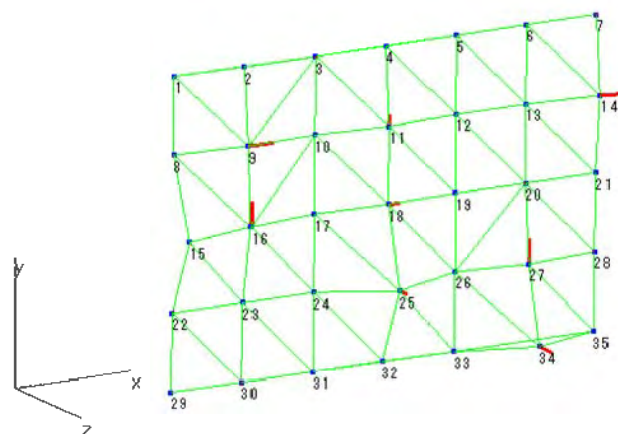


図 5.7 変移量図サンプル

5. 3. 2. 面ひずみ図

面ひずみ図は、各ターゲットの変位ではなく、3個のターゲットから構成される三角形の面積を求め、面積の変化（面ひずみ）により、斜面の動きを確認することができる。

座標原点および座標軸方向が一致しなくとも、計測時にスケールを同時に画像に取り込むことで、長さの単位はほぼ保存されており、特定の3点の距離は、変位が無ければ一定である。この性質を利用して、3角形の面積の変化を求めることで座標変換による計算誤差を伴わない変位比較として面ひずみは有効な手段である。

図 5.8 に面ひずみ算出の例を示す。図では左右・上下方向のターゲット間隔が 10m の場合で、上下方向（三角形の高さ方向）のターゲット間隔が +10mm 変位したときに現れる面ひずみ量%は以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \text{面ひずみ量} &= (10\text{m} \times (10\text{m} + 0.01\text{m}) \times 1/2 - 10\text{m} \times 10\text{m} \times 1/2) / (10\text{m} \times 10\text{m} \times 1/2) \\ &= 0.1\% \end{aligned}$$

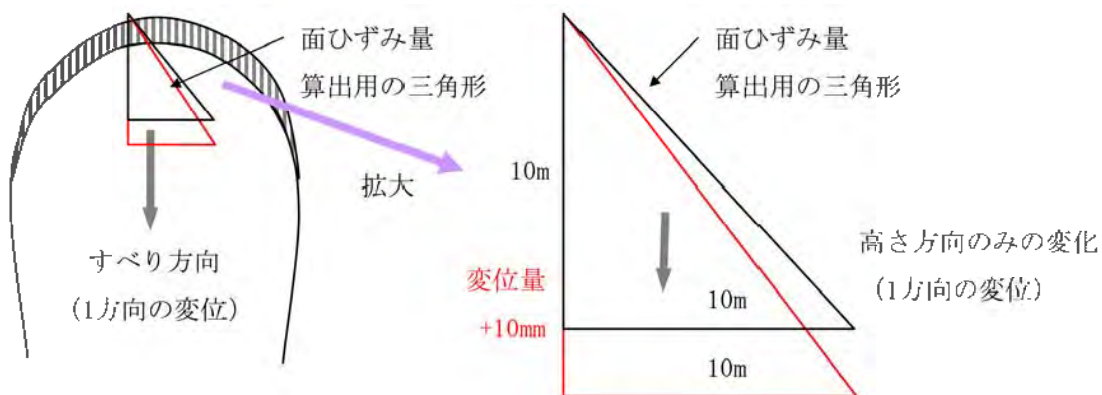


図5.8 のり面におけるすべり方向と面ひずみ量との概念図

計測点群を3三角形に分割して図化する手法（三角網メッシュ・TIM）は、測量の分野では多く用いられているが、メッシュの切り方により、面積を比較しようとする三角形のひずみ量が異なってくるケースがある。（図5.9上）

本論文にて作成したシステムでは、新たに4点で作る四角形を考えた。この四角形を一つの対角線で作る2個の三角形および、もうひとつの対角線が作る2個の三角形、つごう4個の三角形それぞれの面ひずみを計算し、それぞれの三角形の重心位置にひずみ量を持たせて、この値の分布から等値線図を作成してひずみ分布を表現している。（図5.9に面ひずみ図のサンプルを示す）

ただし、面積のひずみ量を計算するとき、計測系の前後軸（Z軸）方向での変位は面積変化に現れにくい。このため面ひずみのみで傾向を判断しようとすることは危険である。

変位量と面ひずみ図の関係

のり面の変位出現パターンと面ひずみ図の関係を以下に示す。

作成モデル：X方向間隔 10m

Y方向間隔 7m

サンプル1（のり面のはらみ出し Z方向+10mm～+30mm）

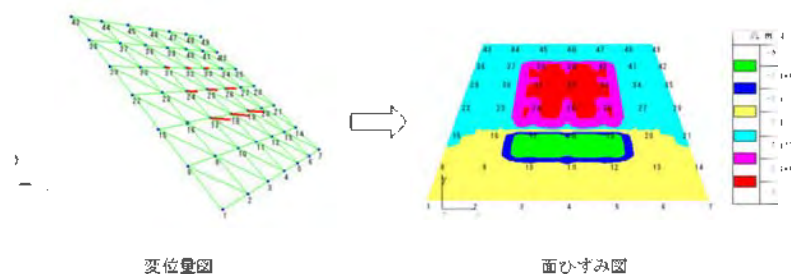


図 5.9 面ひずみ図のサンプル

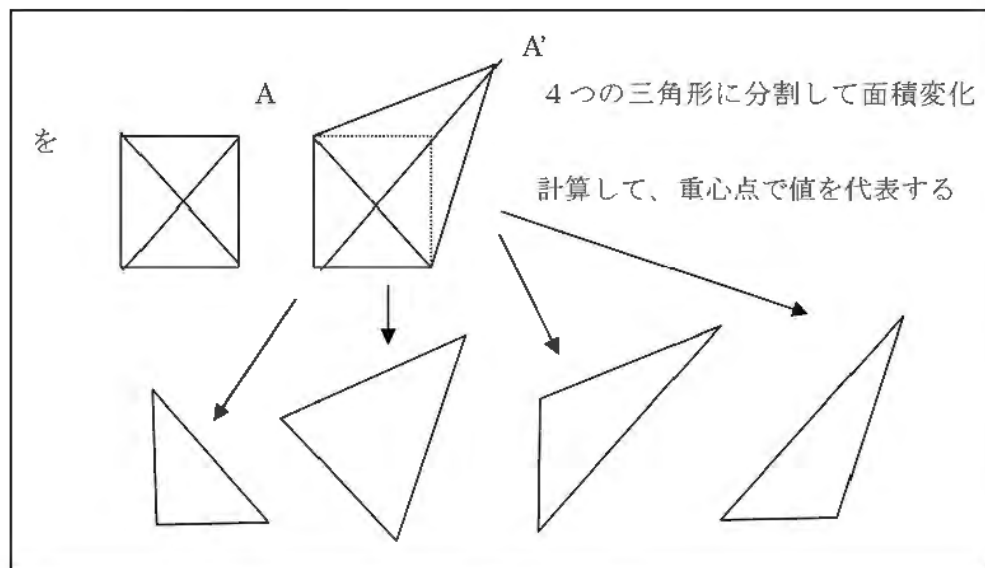
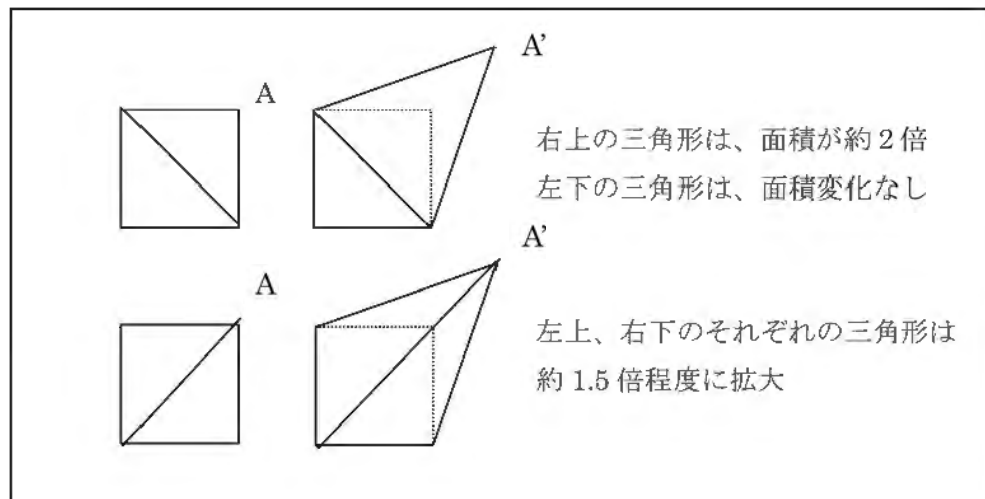


図 5.10 面ひずみ量の計算方法

なお、面ひずみは3点間の距離変化量にのみ着目して管理しようとするものであり、対象とするのり面の土質的な物性値についてはまったく考慮していない。現状では2点間の距離変化以外に、のり面の変位についての管理基準がほとんど無いため、面的な変化量を表現しようとして面ひずみを提案した経緯があるが、実際の現場においては、のり面を構成する岩体の物性値により、小さい変位量でも災害発生の高危険性が高いケースがあったり、逆に変位量が大きくとも地山がそのひずみを吸収して、災害発生の高危険性が低いケースもあったりするため、物性値を変位量とどのように関係づけていくかについては、さらに検討すべき課題である。

5. 4. トンネル掘削現場での地表面変位計測

トンネル掘削現場での地表面の変位計測はトンネル内の変形計測とともに重要な計測項目である。高速道路トンネルの施工現場で保護盛土施工した掘削予定地で地表面の変位を精密写真測量と光波測量により実施した例を以下に示す。

5. 4. 1. 現場状況

本実施例の現場の平面図を図 5.11 に示す。計測対象は、掘削予定地にあつて谷部の部分を掘削前に補強する保護盛土を行った部分である。計測開始時点で、トンネル切羽は盛土斜面の直下にあり、平面図上で右下から左上に向かって掘削を行い、最終計測日までに完全に盛土斜面をとおりぬける予定であった。

変位計測を実施するエリアを図中に赤枠で示している。また、撮影箇所は画面下中央分（下向き赤矢印方向）からで、斜面を見上げるような形での撮影となっている。計測は概ね2週間に1度のペースで実施し、斜面全体が変位する可能性も考慮して、写真撮影と同時に4隅のターゲット近傍を光波により測量した。

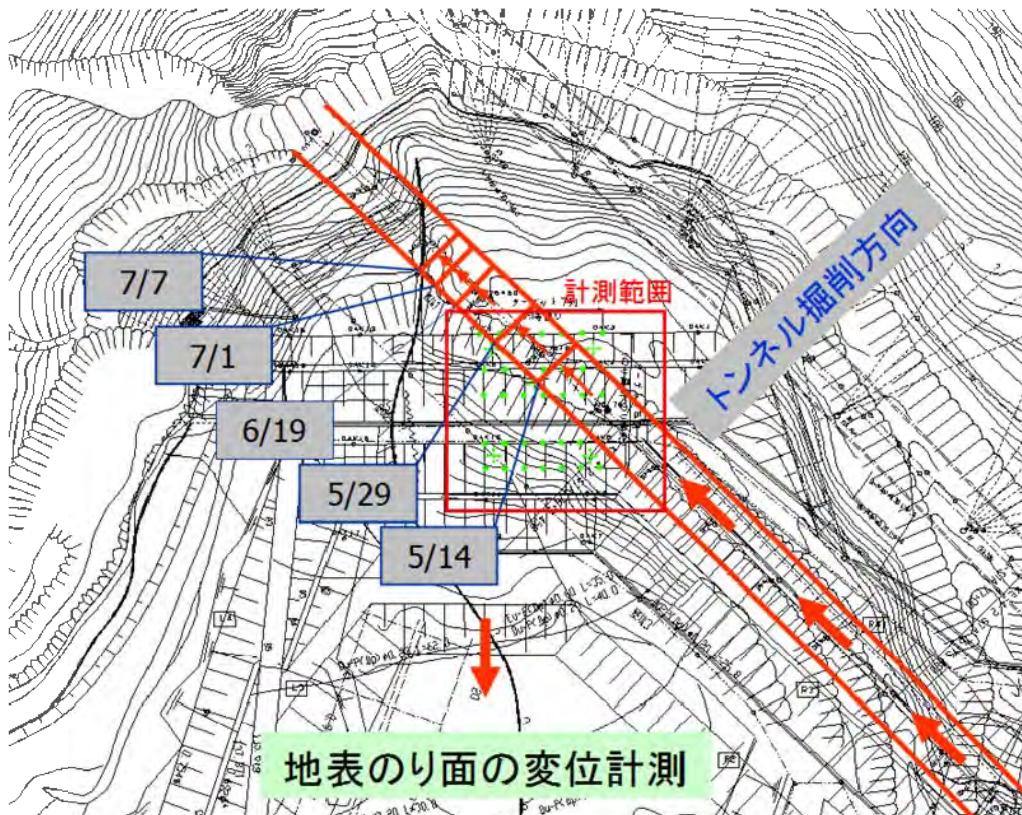


図 5.11 トンネル掘削地域平面図

下図は実際に配置したターゲットである。ターゲットは、足場パイプで固定し、これを地面に打ち込み周囲をコンクリートで根固めしている。ターゲットの設置高さは、周囲の植生に隠蔽されないよう 1 m 以上地表面から高くしている。基準尺は、2つの計測用ターゲットを固定する足場パイプ間を別の足場パイプで接続し、固定する方法で作成した。



図 5.12 ターゲット設置状況

下表に使用機材および現場の撮影条件等を示した。

表 5.11 使用機材および撮影条件

使用カメラ	NIKON D100
使用レンズ	固定焦点レンズ f:35mm
ターゲットの個数	35個
長さ情報	X、Y2方向に5個
撮影位置	9方向及びリフターを用いて地上10mの高さから4方向の合計14方向
撮影距離	L=70m

撮影位置が限定されており、高さ方向の変化が乏しいことから、リフト付車両により、地上 10m の位置も撮影地点として確保した。また、平均撮影距離は、

約 70m であった。実際の撮影状況を図 5.13 に示す。また計測用の写真撮影については高所作業扱いになるため、すべて現場の作業者に依頼した。



図 5.13 現地計測状況

5. 4. 2. 計測結果

各計測日の計測結果を下表に示す。

表5.12 各計測日の読取精度および計算精度

計測日	5月14日	5月29日	6月19日	6月19日	7月1日	7月7日	単位
読取精度	0.13	0.38	0.32	0.17	0.20	0.15	(PIXEL)
計算精度	X	1.57	9.48	3.50	2.22	2.46	(mm)
	Y	1.06	6.25	2.39	1.35	1.65	(mm)
	Z	2.40	14.42	5.40	3.07	3.73	(mm)
	L	1.76	10.60	3.96	2.32	2.75	(mm)
写真枚数	52	40	52	52	43	52	

5月29日および6月19日の1回目の計測は、他の計測日の結果に比べて精度が大きく低下している。(特に5月29日の解析結果が悪い)

6月19日の時点で、計測結果が満足できるものではないとの現場からの指摘を受けて、解析結果を調査した結果、両日の撮影画像は、ピントがぼけていてターゲットが鮮明に写っていないことがわかった。これは、最初フォーカスをあわせたあと移動毎にフォーカス確認をせずに写真撮影を実施したためであった。6月19日に状況を確認した上で、同日に再計測を依頼したため、19日のみ2回の計測になっている。それ以外のデータについては、ほぼ2mm程度の計算精度で測定を実施することができた。

5. 4. 3. トンネル掘削と地表面の変位

図 5.14 に 5 月 14 日と 6 月 19 日の解析結果を比較し、変移量ベクトルを 3 次元で表示したものを示す。

光波計測の結果から、周辺のターゲットもすべて変位していることが確認されたため、2 回目の計測の解析結果について、ターゲットの 3 次元座標値のうち光波計測点近傍のものを、光波計測により得られた変移量分の補正を実施し、1 回目の計測結果と比較のため座標変換調整を行い、差分を求めた。また、3 次元表示した変移量ベクトルは実スケールに対して 100 倍して表示している。

図 5.14 左はほぼ正面やや上側から俯瞰した状態の 3 次元表示であり、図 5.14 右はのり面左側 45 度方向から見た図である。

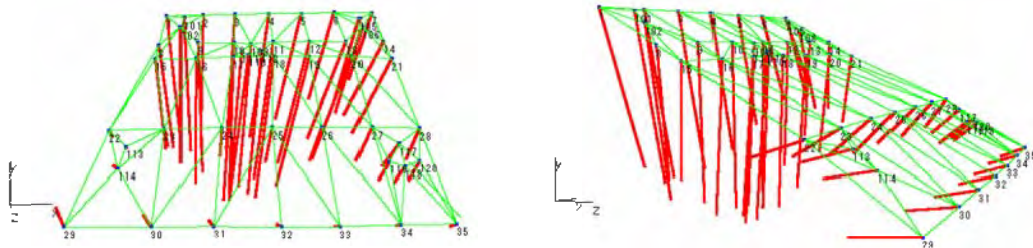


図 5.14 変移量の 3 次元表示 (5/14 - 6/19 差分ベクトル)

図 5.13 から、変移量ベクトルの方向が、計測エリア中央からやや左に寄った点に集中していることがわかる。また、計測エリアの下側部分では、水平に近い角度で、上側部分では垂直から斜面方向によって形でベクトルが向いている。最大変移量は、ベクトル方向が集中する画面中央やや左よりのターゲットで、約 200mm であった。

この位置は、平面図からもわかるとおり、地中のトンネル空間にもっとも近い点であり、掘削の進行により地表面がすり鉢状に沈降している様子を表している。

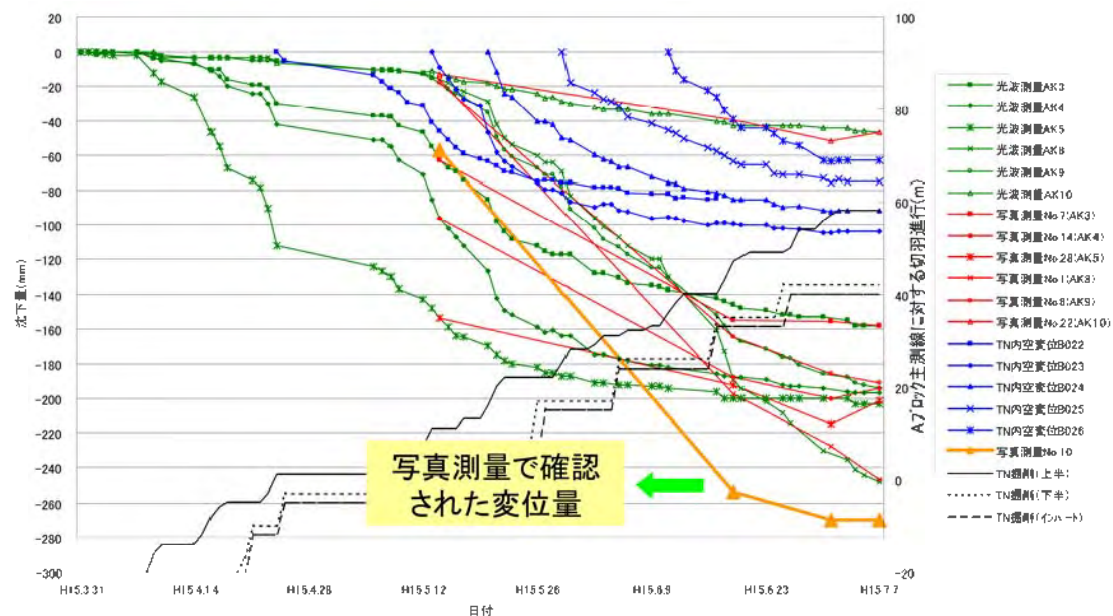


図 5.15 は、光波測量の結果に写真測量で最大変位が計測されたターゲットの垂直変位量（沈下量）を重ねたものである。このターゲットは、光波測量の対象点以外の部分であったが、光波測量で計測されたいずれの計測点よりも大きな変位が確認された。また図から、最初急激に沈下していた点が、時間とともに沈下量が低減していく様子が確認できる。

この結果は、光波測量と比べて、写真測量では一度に多数の点を計測できるメリットをはっきりと示している。また、光波測量と併用することで、全体に変位するような現場においても、精度良く計測をおこなうことができることを確認できた。

5. 5. まとめ（課題と解決法）

これらの現場実施例より、以下のような問題点が提起・確認された。

①作業効率の問題

写真撮影枚数を当初想定（7地点 28枚撮影）した数量でテスト解析した結果、撮影位置と距離の関係から計算精度が不足していたため、さらに安定して高い精度を求めるため撮影位置・撮影枚数を追加した。（40枚～60枚程度）

このため、解析計算を実施する前の各写真のターゲットのマーキング処理に作業時間を多く要するようになり、作業自体およびその結果のチェックのために作業者の負担が増加した。

②解析計算結果が適正なものかを判断できない。

手順書どおりに、撮影～解析処理の作業により結果を得たが、その結果についての評価が難しいため、再計測が必要かどうかを判断できない。実際にフォーカスのずれた写真をそのまま解析して、求める精度の結果を得られていない計測日があったが、再計測は実施しなかった。

また、求める精度を満足するためには何枚・何箇所から撮影すればよいかわからないという作業者からの意見が多かった。

上記の問題点は、精密写真測量システムを運用し始めた当初より漠然とは認識されていたが、

①作業量の増加については、開発関係者が当初は解析作業を行っており、ある程度作業慣れしていた点があり、あまり負担に感じておらず、顕在化した問題となっていなかった。

②結果の評価についても、開発関係者は、ある程度基礎的な仕組みを理解した上で作業を実施していたため、自己基準的な判断により精度低下の確認と予防措置を講じるような傾向があったため、あまり問題としての認識がなかった。

ということで、経験により改善される内容として捉えられており、普遍的な問題としての認識レベルは低かった。しかし、汎用的に利用されるためには、やはり作業効率の改善と結果の良否の判断について、十分に吟味し、解決のための措置を講ずる必要があった。

以下に、上記の課題を解決するための方策を示す。

5. 5. 1. 作業効率の低下に対する対策

写真1枚毎に、すべてのターゲットのマーキングを行い、結果をチェックする作業は、写真枚数が増加するについて、単調作業となりエラーが発生しやすくなる。また、ここで誤りがあると、解析計算で収束しないため、再度画像を確認する必要が発生し手戻りになる、といった大きな問題が生じる。

この問題を回避するためには、ターゲットのマーキング作業を自動的に実施することが重要なテーマとなる。

自動判定の機能が100%完璧なものである必要はなく、80%~90%の部分を自動的に実施し、結果のチェックの際に作業者が残りの部分を補完する形でマーキングすることが出来れば、作業効率は飛躍的に向上する。

5. 5. 2. 解析結果の良否の判定に対する対策

精密写真測量では、カメラの外部標定要素（撮影位置・撮影方向）についても、変数としており、概略初期値設定し、セルフキャリブレーションにより精密値をもとめることが特徴となっている。このため、計画で指定された位置から撮影しても2回の異なる撮影で同じ位置・方向で撮影することは非常に難しい。

また、上木の現場では、2箇所として同じ状況であることはなく、それぞれ現場に合わせたターゲット配置、撮影位置となるため、普遍的な方式と結果を規定することができない。このため、計画段階でシミュレーションを行い、撮影位置やターゲット配置、撮影枚数を決定することが出来れば、その現場での求められる最高の精度への指標設定が可能となり、個々の解析結果の良否を判定することが可能になる。

参考文献

- (1) 日本道路公団, 1992, 土質・地質調査要領
- (2) 高速道路調査会, 1987, 地すべり危険地における動態観測施工に関する研究 (その3)
- (3) 日本道路協会, 1999, 道路土工・のり面・斜面安定工指針
- (4) 秋元圭一, 2002, 情報化施工のためのデジタル画像計測法に関する研究, 京都大学大学院博士論文

第6章 カラーターゲットによる処理手順の自動化

6. 1. 概説

本章では、撮影した写真毎に行うターゲットのナンバーリング作業を自動化するための手法を検討し、カラーターゲットを用いることで、処理を自動化する手順を示す。従来は、人手による作業により、4点から5点のターゲットをマーキングし単写真標定によりカメラの外部標定要素を求める。この結果から後方投影により他のターゲット位置を推定しており、この作業が全作業時間の半分以上を費やしていた。

ターゲットをアプリケーションにより自動的に認識させるために、コード化した配置パターンや着色したターゲットを使用する方法を検討し、色空間の表記方法を RGB とそれ以外で比較し、ソフトウェアで同系色を認識するために適当な表記方法があることを確認した。

6. 2. 基本システムの作業手順

精密写真測量を用いた斜面モニタリングシステムでは以下のような手順により計測を実施している。

- ①画像取得：デジタルカメラによる撮影（20枚～60枚）
- ②画像のソフトウェアへの取り込み[自動]
- ③カメラ外部標定要素検出、後方投影による画像上のターゲット位置特定（すべての撮影画像に対して実施する）
- ④解析計算：セルフキャリブレーション付バンドル調整法による計算
- ⑤結果の検証と再計算
- ⑥前回計測と比較

表 6. 1 精密写真測量法による作業時間

作業項目	作業詳細	時間(分)	備考	比率(%)
画像取得	現地において計測対象を撮影する	60	28枚	26
画像取込	パソコンに画像データを変換して取込む	20	自動	9
ターゲット取得	画像上のターゲット位置特定・カメラ外部標定	130	手動	57
解析計算	バンドル調整計算	10	半自動	4
結果の検証	異常値の確認	5	手動	2
前回値との比較	前回の計測結果との比較	5	自動	2

現場作業については、撮影位置へのアクセスのしやすさにも依存するが、平均1箇所当たりの所要時間は3分程度、7地点での撮影でも移動時間を含めて

1 時間程度の作業である。しかし、室内作業において、画像の取り込み～ターゲット位置特定について 1 枚あたり 5 分程度を要しており、7 地点（28 枚）の画像を処理するのに約 2.5 時間（全体作業の約 65%）を要している。このうち、ソフトウェアの取り込みについては、自動化されているため人的な負荷はほとんどなく、昼休み・夜間等を実施させることが可能である。

解析作業・結果の検証については、おおよそ 10 分～20 分程度で実施できるため、上記の②取り込み、③ターゲット特定の作業時間について作業性が改善されれば、全体の処理における人的作業量が減少する。②取り込みについては、前述のとおり自動化されているため、③ターゲットの特定の効率化が全体の作業性の向上（人的負荷の減少）に直接的に影響する。「ターゲット位置特定」の手順の効率化（自動化）を検討するため、以下に現在の作業手順を検証した。

6. 3. ターゲット位置特定の手順

ターゲット位置特定の手順は次のとおりである。

- ①画像を表示する
- ②画像内のターゲット 4 点～6 点程度をクリックし、登録されたターゲットの番号を入力する。
- ③撮影位置の概略値を入力し、すでに入力したターゲットの位置関係から後方交会法によりカメラ外部標定要素の推定計算を実施する（単写真標定）
- ④推定された撮影位置から、後方投影により登録されているターゲット 3 次元座標初期値によりターゲットの画像上の位置の推定計算を実施し、画像に推定位置を表示する
- ⑤推定ターゲット位置が実際のターゲットの近傍にマークされていることを確認し、おおきくずれている場合には手動で移動させる
- ⑥ターゲットの微調整処理を選択し、連続的にターゲットの中心位置を検出する
- ⑦処理結果を保存する

これらの作業手順の内、②のターゲットの指定および番号の入力は、それほど複雑な作業ではないため、専門的な技能を要するわけではないが、ここでの番号の設定は、ターゲット自体に番号が表記されているわけではなく、画像の周囲の地物からターゲットの番号を推定し入力する必要がある。ここで番号を誤って入力すると、③以降の処理が全て正常に実施されないため、なかなか求める結果に到達できない。具体的には、一つのターゲットの番号を 1 番異なる番号とすると、後方交会法によるカメラ位置推定計算の収束が悪く、ターゲットの位置推定についても実際の画像上のターゲット位置から大きく離れた位

置にマークされるため、その修正に多くの時間を要してしまう。

また、ターゲットの位置関係に習熟している作業者の場合には、作業自体は遺漏なく完了できるものの、内容については単純作業であり、これを 30 枚、40 枚と実施することは、作業者にとっての精神的な負荷が大きくなる。

このように、画像内での 4 点以上の特定のターゲットについて、その位置と番号をプログラムにより自動的に特定できれば、作業の精度向上と手戻りの防止、単純作業項目数の減少が期待できる。

6. 4. ターゲットの位置と番号の特定

画像上からターゲットに位置とその番号を特定するためには、

①『コード化ターゲットの導入』

ターゲットの特徴的な配置によるパターン化とそのパターンを認識する手法を導入する

②『撮影位置の高精度検出』

カメラ位置（撮影位置の座標）と方向角、上下角、回転角を正確に取得し、前章②、③の作業自体を省略する

③『カラーターゲットの導入』

特定のターゲットをカラー化し、ターゲットの番号と色情報を一致させることにより、特定色のターゲットを認識する手法を導入する

といった方法が考えられる。

この内、②の方法については、精密写真測量法の利便性をまったく無視するもので、新規に位置・角度を計測する機材を開発または導入する必要があり、撮影時の作業についても煩雑になるために、現実的な方法とはいえない。

①に示したパターン化したターゲット配置については、ターゲットサイズが 450 mm角から 600 mm角のターゲットを複数枚組み合わせてコードパターンを作成し現場に設置する必要があるが、大きなターゲットを作成するための技術的問題およびこれを保持するために大掛かりな設置用構造物が必要となるため、土木施工の現場においては実現させることが困難である。

また、工業計測の分野においては、レトロターゲットと呼ばれる反射ターゲットを用いる従来の精密写真測量法における研究（メルボルン大学：フレイザー教授他）で実現されているが、斜面のモニタリングといった屋外のフィールドにおいては、反射ターゲットを長期間保守することは非常に難しい。さらに、レトロターゲットを使用した場合には、ターゲットだけが明瞭に撮影できるよ

うにストロボ撮影を実施する必要があるが、道路のり面の計測のように撮影距離が離れている場合には、強力なストロボを使用する必要がある。⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

しかし、ストロボを使用する方法については、施工中の斜面であれば作業時間外に実施する等で適用することが可能であるが、供用中の道路のり面の撮影においては、撮影位置によっては通行車両に対して事故を誘発する要因になりかねないため不适当であり、現場での利用には適さない。

③のターゲットのカラー化については、室内（管理環境下）計測において管理された光源により撮影されたデジタル画像のRGB値を元に、特定色の抽出およびトラッキングを実施するといった、いわゆるビデオトラッキングまたはイメージトラッカーといったアプリケーションはすでに存在しているが、屋外（自然環境下）計測におけるカラーターゲットの検出に関する研究事例の報告はほとんどされていない。

現行方式で用いているターゲットは「白色の四角で、周囲に黒ふちをつけ、周囲から明瞭に区分できる特徴をもつことでストロボ撮影を行わなくともターゲットの中心検出が可能」という、検証試験をもとに規定した形状である。したがって、カラー化したターゲットが、白色のターゲットと同様の中心検出が可能であるかどうかについては、検証実験を実施する必要がある。しかし、カラーターゲットを撮影位置特定の目的に特化したインプット（インデックス）データとして用いれば、中心検出精度が多少低下しても、解析結果に影響を及ぼさない。

このカラーターゲットを精度よく検出する手法を確立することで、現行システムの手順自体には大きな変更をすることなくターゲットの位置と番号の特定を実施することが可能である。

6. 5. 画像データの色空間

デジタルカメラは銀塩フィルムの代替として、カラーフィルターを配した CCD 素子または COMS 素子とよばれる撮像素子に投影された風景を光電変換により電子データに変換して記録する。デジタルカメラによる撮影画像は通常では RGB の 3 チャンネルの数値の組み合わせにより表現される。このような画像の数値による表記には多種多様の方法があり、その表記方法は色空間（または〇〇系表記）と呼ばれる。

色の定義とは、「目にはいる放射の分光組成 (spectral composition) の差によって、性質の差が認められる視知覚の様相、または前記の視知覚を生じる放射の特性、または物体の特性」(JIS Z 8105) とされているが、具体的には、

- (1) 有彩色成分と無彩色成分との組合せからなる視知覚の属性であり、この属性は、黄、オレンジ、赤、ピンク、緑、青、紫などの有彩色名、もしくは白、灰、黒などの無彩色名を、明るい、暗いなどで修飾したもの、またはこれらの色名の組合せで記述される。

- (2) 三刺激値のように、算出方法が規定された 3 個の数値による色刺激の表示。

によって表現されるものとして定義することができる。

色の見え方は光源の種類や物体の性質などにより変化するが、物の色であれ空や水の色であれ、色味と明暗と濃淡の印象を伴う点はどの場合も共通している。これはいわば色を人の側から見た主観的印象に過ぎないが、それには、色相と彩度、明度の三つがあり、これらを色の三属性という。

色相(hue)は赤・緑・黄・青などの色の質的性質の相違を表し、特定の波長成分が卓越しているかどうかによって定性的に区分することができる。すべての色相を円環状に配したのが色相環である。色相環上の相対する 2 色は、互いに補色の関係にある。

彩度(chroma)は色の鮮やかさの度合いを示す。彩度が限りなく低いのが白・灰・黒などの無彩色であり、彩度が多少でもあれば有彩色となる。有彩色のなかで最も彩度が高いものが純色(full color)である。

明度(lightness)は色の明るさの度合いを示す。有彩色であれ無彩色であれ、色には明るい色と暗い色があり、明度の高低は、物の表面の反射率の高低と密接な関係がある。⁽²⁾

色空間(いろくうかん)とは、色を数値(チャンネルと呼ぶ)の組み合わせによって表現するための方法である。英語の Color Space からカラースペースともいわれ、3種類か4種類の数値を組み合わせることにより表現される。色空間は主に色の再現(特にデジタルの表現)に役立つ。デジタル印刷やディスプレイなどには欠かせないものである。以下に、代表的な色空間の定義を示したあと、RGB と HSV による色空間表記について、その特徴とターゲットの自動検出への適用について示す。

6. 5. 1. 代表的な色空間表記法

以下に代表的な色空間表記法(表色系)を示す。

○RGB

RGBは一般に、加法混色を表現するのに使われる。光の三原色をもととして、数値を増すごとに白に近づく。反対に、数値を減らすごとに黒くなる。コンピュータのモニターで用いられるのも、このRGBである。RGBは、それぞれ赤(red)緑(green)青(blue)の頭文字である。デジタルカメラにおいては、撮像素子にRGBの各波長帯域通過フィルターを組み合わせることで、撮像面の色分布を計測し記録している。

○RGBA

RGBAはRGBの色空間に加えて、透過(透明度)を表現するアルファチャンネルも色決定に考慮させる。

○CMK

CMYは印刷の過程で利用する、減法混色の表現法である。色の三原色からイエロー(yellow)を除いた表現である。CMKには、シアン(cyan)、マゼンタ(magenta)、そして黒(black)のインクの数値が含まれている。一般的にイエローの使用頻度が少なく、CMKだけで十分表現可能であり、印刷コストも下がることから低価格印刷物に利用されている。

○CMYK

CMYKは印刷の過程で利用する、減法混色の表現法である。色の三原色を元としている。基本色は白で、それに色の度合いを加えて(減法)、黒色にしていく。すなわち、始めは白いキャンバスから始め、インクを加えて暗くしていくということである。CMYKには、シアン(cyan)、マゼンタ(magenta)、イエロー(yellow)、そして黒(black)のインクの数値が含まれている。

○HSV

HSV の表記方法は、先に示した色の三属性による表記に最も近く、人間の感覚的に受入れやすい表記方法である。HSV はコンピュータで絵を書く場合や、色見本として使われる。これは、色を色相と彩度という観点から考える場合、加法混色や減法混色よりも自然だからである。HSV では色相(hue)、彩度(saturation value)、輝度(value)の3値で色を表現する。アルバート・ヘンリー・マンセル (Albert Henry Munsell)はこの表記方法の規格化を提発案し、色を5つ(R、Y、G、B、P)に分け、更にと中間に YR、GY、BG、PB、RP)の5つを設けた。さらにそれらの色相を10で分割した計100色相として規定した。この規格はマンセル表色系とよばれる。マンセル表色系は日本では、JIS Z 8721 (三属性による色の表示方法) として規格化されている。

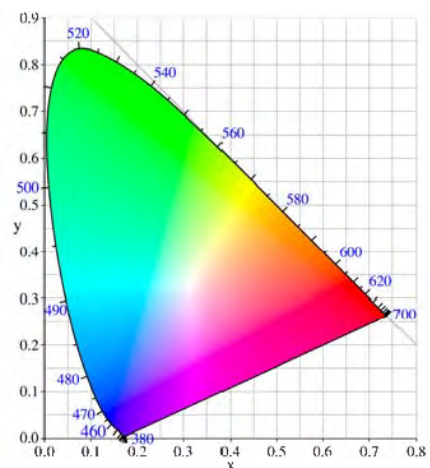
○YIQ, YUV, YCC, YCbC (いずれも映像信号向)

YIQ は、NTSC カラー映像信号で使用されている。YIQ にはルミナンス(輝度)と2つのクロミナンス(色差、YIQ の場合大体色の中の青と赤の量に相当)の値が含まれる。これは、PAL テレビや JFIF 形式の JPEG 画像で用いられる YUV(YCC(正確には YCbCr)とも)に非常に似ている。ただし、YIQ は1950年代当時のカラーのブラウン管の性能に基づき定められており、当時は青の発色が悪かったため、YIQ は青の表現力に欠ける面がある。

○CIE 表色系 : CIE (国際照明委員会) が定める各種の表色系。

・ CIE-XYZ 表色系

RGB 表色系は色知覚のよい近似であるが、知覚できる色を完全に合成できるわけではない。たとえばレーザー光などにみられる単一波長の色は RGB 色空間の外側であって、加色によって再現することができない。この問題は、RGB の係数に負の値を許可することによって色空間を拡張すれば表現することができるが、取り扱いに不便である。したがって RGB 表色系を単純な一次変換で負の値が現れないように定めた XYZ 表色系を、CIE は1931年に RGB 表色系と同時に定めた。XYZ 表色系は他の CIE 表色系の基礎となる。RGB 表色系と異なり XYZ 表色系では、それぞれの数値と色彩との関連がわかりにくい。Y は明度を表し、Z はおおむね青み



の度合いを表すと考えてよい。Xは、それら以外の要素を含むと考えられる。

・ CIE-L*a*b*表色系

CIE 表色系 (XYZ 表色系) は、色を定量的に数値で表す点では、他のどの表色系よりも優れている。しかし、色度図の表記が不等間隔であり、図中の距離がかならずしも感覚上の色の差を表してはいなかった。この不具合を修正し、CIE が採択した均等色空間 (uniform color space) 表記法が、L*a*b*表色系と L*u*v*表色系である。これらの表記法は日本工業規格としても採用されており (JIS Z 8730 色差表示方法)、特に色の管理には L*a*b*表色系が用いられている。ある色と他の色の色差を知るには、L*軸、a*軸、b*軸の差をそれぞれ二乗したものの和の平方根、つまり、2つの座標の距離を求めればよい。L*a*b*は CIE XYZ を直接の基礎として、色差の知覚の線形化を試みている。L*、a*、b*の非直線関係は、目の対数的な感応性の模倣を目的としている。ただし、コンピュータグラフィックスとしては、L*a*b*の色空間は RGB で表記される色空間よりも広いため既製ディスプレイでは対応しておらず、表現できない色が生じてしまう。また、対象物を光源に影響されない絶対色として表記するために、対象とする物体色と同一照明下の完全拡散反射面の 3 刺激値を別に取得しておくことが必要となるため、過去に撮影したデジタルカメラの画像データについては変換することができない。

これらの表色系 (色空間) を用いて、目的に応じて被写体の色を定義することができるが、表現結果についてはそれぞれに共通する注意が必要な点がある。RGB 表色系を例にとれば、例えば赤といってもいろいろな赤があるのであって、赤・緑・青の基準を定めないことには正確な色表現ができない。さまざまな表色系が存在するが、それぞれの表色系ごとに、赤・緑・青の基準が定められている。さらに、われわれが計測しようとする対象は、放射光ではなく、反射光である。センサー・フィルム等で画像を取得する場合、暗闇では何も撮影することはできない。

このように、被写体の色を波長 (スペクトル) 帯域で定義しても、その値は、それが撮影または計測された環境における照明 (環境) 光の波長成分に大きく左右される。例えば、蛍光灯下での撮影では、光源に赤色の成分 (長波長成分) が不足するため、全体に青から緑がかった色合いで撮影されてしまうし、白熱灯下での撮影では発熱発光のため、青色の成分 (短波長成分) がほとんどないため、全体に黄色からオレンジがかった色合いで撮影されてしまう。

また、屋外での撮影においても、早朝や夕方といった時間帯では、光の屈折率の違いにより長波長成分が高めになり撮影画像は赤っぽくなってしまう（朝焼け・夕焼け）。このため、デジタルカメラ・デジタルビデオ等では、ホワイトバランス調整という出力調整機能が備わっているが、この調整も完全なものではなく、照明の光源にない波長帯域の色成分については、表現力が低下してしまう。このように、カラーカラーインデックスを作成し、同系色を抽出しようとする場合、インデックスの光源と計測対象を撮影する場合の光源が一致していることが重要である。

6. 5. 2. デジタルカメラ画像の特徴

デジタルカメラの画像は、RGB の色成分の数値データとして記録されている。光の3原色によるこの色表記はセンサーの出力値の直接的な数値であり、モニター等に画像として出力する際のデータとして変換することなく使用できる。しかし、RGB系による表現は、色合い・同系色のグルーピング等、人間の目（脳）の色判別とは異なる表現系であり、RGB系による表記では、撮影条件により微妙に異なるターゲット色を自動検出する処理を手順化することは難しい。以下に、RGB系の色空間の特徴について示す。

6. 5. 3. RGB系の色空間の特徴

RGB系による表記は、光の信号を赤（R）、緑（G）、青（B）の3成分（光の3原色）に分解し、それぞれの強度を数値化することにより得られる値で画像を表現する方法である。（図 6. 1）

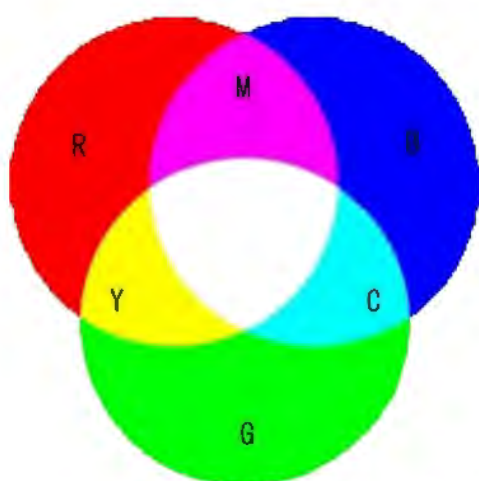


図 6. 1 RGB系の色空間

CCDのフィルター配置
(原色フィルター)

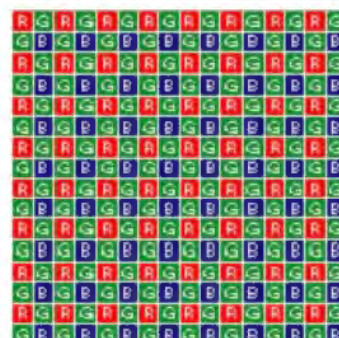


図 6. 2 CCDのフィルター配置

RGB系の色空間では、たとえば、フォトセンサーにRGBの各フィルターを貼付す

ることにより、特定の点の色（反射光）を簡単に数値情報として取得することができる。現在のデジタルカメラ、ビデオカメラに用いられている CCD 撮像素子はすべてこの原理を用いて画像を記録している。（図 6.2）

RGB 系の表記はカラー印刷を行う際に CMYK（RGB の補色＋黒）の色インクにより表現できる。しかしながら、人間の目では、ある特定の色を見て赤がいくつ、緑がいくつ、青がいくつと数値的に体感することはできないし、その色に緑を 30、青を 20 加えたときの色を想像することは不可能である。

このように、RGB 系の色空間は入出力デバイスに対して、非常に親和性の高い表記形であるが、人間の感覚的な表現とはまったく異なった表現形である。そのため、RGB 系の色空間で表現されるデータにより特徴量を抽出しようとする、アルゴリズムで表記すること（またはプログラミングすること）は非常にむずかしく、また、その検証を実施することも困難である。

このため、RGB 系の色空間で記録されたデータをアルゴリズムにより同系色を抽出できる色空間に変換して処理する必要がある。

6. 5. 4. HSV 系の色空間の特徴

先に示したように、色の三属性は色相と彩度、明度値で表記される。HSV ではこの三属性にほぼ等価である色相(hue)、彩度(saturation value)、輝度(value)の3値で色を表現しており、知覚としての色を表現する場合や、同系色を特定するのに適している。

なお、CIE- $L^*a^*b^*$ についても同様に色の三属性により表記される色空間であるが、先に示したように絶対色として対象物の色を定義しようとする表記法であり、対象とする物体色と同一照明下の完全拡散反射面の3刺激値のデータがインデックスとして必要となるため、現場での計測時に作業が増加する。

比較の対象となる色は同じ条件化で撮影されたカラーターゲットの色であるが、ほぼ同一な撮影条件下で撮影したデータ間で、同じ系統の色を識別できればよく、絶対色として値を設定する必要がある。また、変換式が複雑であり、 $RGB \rightarrow XYZ \rightarrow L^*a^*b^*$ と2回の変換が必要となるため、処理時間が増大する等の理由により本研究では採用しなかった。



図 6.3 色相 (H) の定義



図 6.4 彩度 (S) を加えた色空間

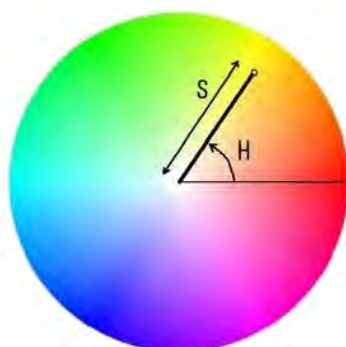


図 6.5 色相 (H) と彩度 (S) の関係

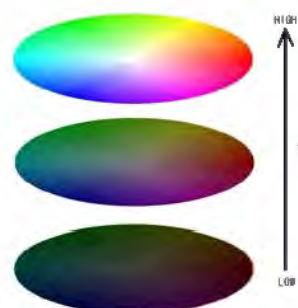


図 6.6 輝度 (V) の定義

図 6.3 から図 6.6 は、HSV 系の色空間の定義を色相 (H)、彩度 (S)、輝度 (V) についての定義を図示したものである。

色相は、対象色の絶対的な色 (感覚的な色) を表しており、その純度 (彩度 : 鮮やかさ) とは無関係に表記される。このため、薄暗く撮影された画像でも、はっきりと明瞭な照明の下で撮影された画像でも、同じ色の物体は、同じ色相値をもつことになる。

彩度は、その色の純度または鮮やかさを示している。彩度が高くなるとその色の濃さ (鮮やかさ) が明瞭になり、逆に低くなると白っぽい淡い色合いとなる。

輝度は、その名のとおり、そのデータの示す明度であり、輝度が低いほど暗く、また高いほど明るくなる。(テレビ画面の明るさ調節とおなじ意味合いである)

図 6.7 は、図 6.3 の色相の円環について 180 度 (CYAN) を中心に直線で表したものである。この図から、水色 (CYAN) を抽出するためには、180 度を中心に各画素 (ピクセル) の色相値について 180 度からの角度差 (オフセット) を計算し、角度差の少ない画素のみを選択すればよいことがわかる。この手順により水色に近い色あいをもつ画素の検出が RGB 値により算出するよりも単純なアルゴリズムで実現可能である。



図 6.7 直線で表現した色相 (H)

このように、HSV 系の色空間の表現では、〇〇に近い色、同系色といったあいまいな色表現の対象を比較的容易に定義し、分離することが可能になる。

6. 5. 5. RGB ベクトルと色相 (H)、彩度 (S) との関係

図 6.3 の色相環を六角形に変形し、120 度離れた 3 軸を RGB 軸とすると、色相 (H) は RGB の色ベクトルの和の方向角として表記できる。(図 6.8)

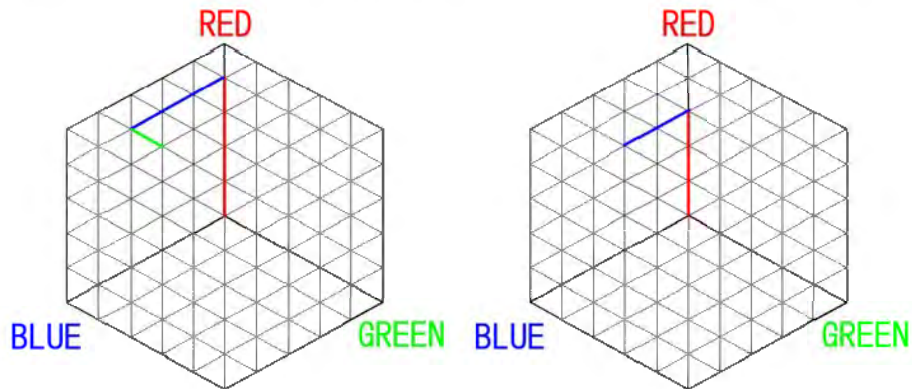


図 5. 7 RGB ベクトルと色相 (H) の関係

ここで注目することは、たとえば RGB(8, 2, 6) (図 6.8 左) のベクトルの合成値と RGB(6, 0, 4) (図 6.8 右) のベクトルの合成値が同一点を示していることである。(図 6.8 で 1 グリッドをベクトル値 1 と仮定する) これは、色相 (H) および彩度 (S) が RGB の 3 色の合成ではなく、最小値となる色成分 (例では G=2) をすべての色成分から減じた残りの 2 色により規定されることを示している。つまり、すべての色相 (H) および彩度 (S) は RGB の 3 色中 2 色の特定比率の組み合わせで構成されており、すべての色はこの組合せに黒-白のグレースケール値 (輝度: V) を加えることで表現することができるということを示している。

6. 5. 6. RGB から HSV への変換アルゴリズム

前項で示したとおり、RGB と HSV の関係は演算が可能な変換である。RGB から HSV への変換は以下のような手順で実施する。

○RGB → HSV 変換

$$V = \max(R, G, B)$$

$$S = (V - X) / V \text{ ただし } X = \min(R, G, B)$$

H は次の式で表される。

$$R = V \text{ の場合 } H = (\pi / 3) * (b - g)$$

$$G = V \text{ の場合 } H = (\pi / 3) * (2 + r - b)$$

$$B = V \text{ の場合 } H = (\pi / 3) * (4 + g - r)$$

$$\begin{aligned}\text{ただし } r &= (V - R) / (V - X) \\ g &= (V - G) / (V - X) \\ b &= (V - B) / (V - X)\end{aligned}$$

H : 0 ~ 360 S : 0 ~ 1 V : 0 ~ 1
R, G, B : 0 ~ 1 とする。

HSV 系はあくまでも RGB 系のデータを 1 対 1 に変換したものであり、別のセンサーによる計測値によって補正するものではない。また 1 対 1 の写像であるため、HSV に変換したデータを輝度のみ補正したのち、再度 RGB に変換するというようなことも可能である。

6. 6. カラーターゲットの自動検出

上記の HSV 系の色空間表記をカラーターゲット検出に適用するための検討を以下に実施した。

6. 6. 1. HSV 系の色空間における特定色の検出

図 6.9 は、赤 (0deg)、黄 (60deg)、緑 (120deg)、青 (240deg) の各色に着色したバーおよびボールを撮影した画像について、色相 (HUE) に着目してそれぞれの角度での類似度を画像化したものである。各画像で白っぽく表現されている部分はその角度での最大値を表しており、バーおよびボールについて、それぞれの角度値での類似度が上がっていることがわかる。

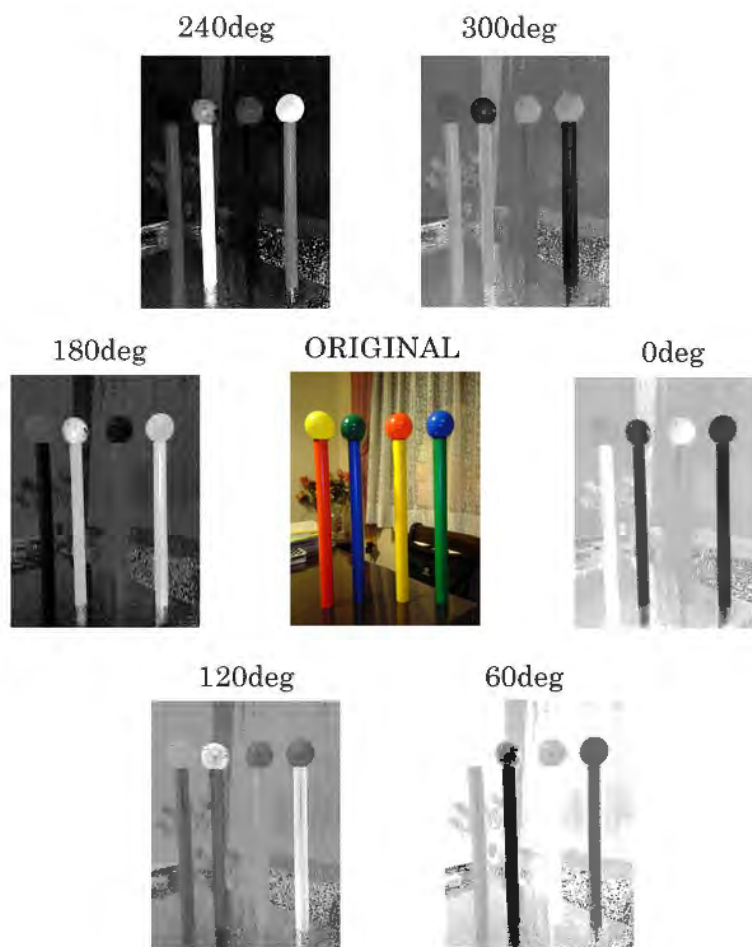


図 6.9 色相 (HUE) による同系色の検出

対比の意味で、図 6.10 に同様のオリジナル画像に対して、RGB のそれぞれの色成分で分離した画像データを示す。RED のチャンネルでは、赤および黄色のバー・ボールについて、赤色成分が強いため白っぽく撮影されている。しかし、

GREEN および BLUE のチャンネルでは、緑および青のボール・バーは、RED における赤・黄色と比較すると鮮明な白にはなっていない。これは、緑および青のボール・バーが、CCD センサーの規定する GREEN・BLUE の色とは微妙に異なるため、各色チャンネルにおけるデータの強度があまり高くないことを示している。

このように、RGB での色判別は、青・緑と肉眼では見えるものが、デジタルデータ上では、BLUE または GREEN が 100% のデータではない場合、数値処理としてそれぞれの色の物体を抽出することが難しいことがわかる。

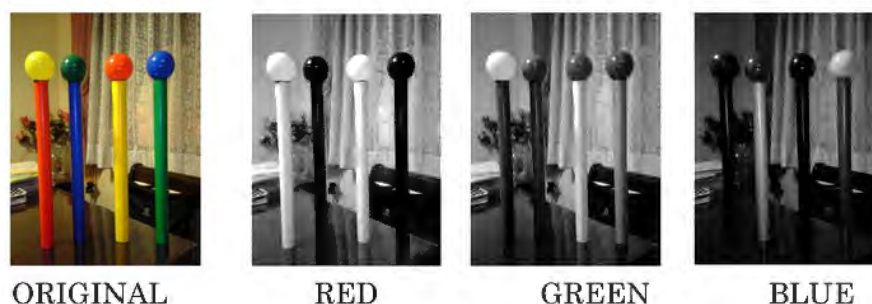


図 6.10 RGB に分解した画像イメージ

これに対して HSV の表記方法を用いる場合には色相に着目することで、緑に近い色については GREEN の近似度が高く、青に近い色では BLUE の近似度が高くなり、プログラムとしてアルゴリズムを表記した場合、各色の物体を抽出することが比較的容易になる。

6. 6. 2. カラーターゲットの検出

前述のとおり、HSV 系による表記（色空間）を用いることで、色相（Hue）により同系色をグルーピングし、対象とするターゲット色を検出する手順をアルゴリズムとして表記することが可能である。本処理に必要なターゲット色は 4 色であり、光の 3 原色およびその補色（RGB、YMC）を基本的な指定色として、現地背景色と明瞭に区別する色合いの 4 種を選択することで、個々のターゲットを検出および識別することができる。

図 6.11 は、赤色のカラーターゲットを屋外において 5 方向から撮影して、ターゲット部分の画素の平均値を RGB および HSV で表記したものである。RGB の値で判断すると、それぞれの方向から撮影したターゲットの値には共通性はないが、HSV で表記してみると、H（色相）については 5 方向ともほぼ同一の値を示している。方向 4 および方向 5 でやや明るく撮影されたものについては、HSV では V（明度）の値のみが他と比べて高くなっていることがわかる。このため、H

および S に着目して近似度を判定することで、特定色のターゲットを撮影条件の変化によらずに検出することが可能であると想定できる。

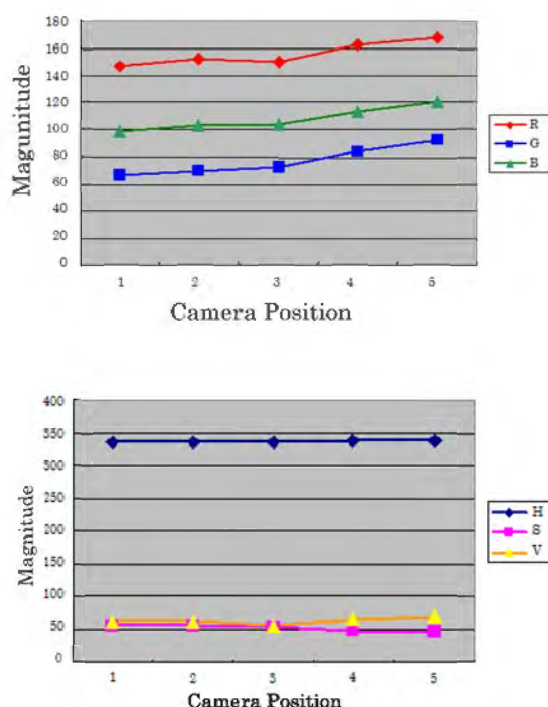


図 6.11 赤色カラーターゲット部の色成分構成
(RGB および HSV、撮影地点 5 箇所)

実際の検出の手順としては、ターゲットを撮影した数十枚の画像から 1 枚を選択し、そこで撮影されているカラーターゲットについて、各色のターゲットを人間がマウス等で指定する。これにより、それぞれのターゲットの色相基準値が設定され、他の画像（明度の異なるものがあったとしてもかまわない）について、同様の色相値のターゲットを検索していく。

ただし、前に示したとおり、撮影条件により（曇り・雨・早朝・夕方）、光源の状況が変化する（早朝では画像は全体的に青みがかり、夕方では赤っぽくなる）ため、2 回以上の比較計測については、計測の都度、必ず 1 枚の画像のカラーターゲットは人間の手作業により指定する必要がある。

6. 7. フィールドテスト

実際に、計測中の現場にカラーターゲットを設置し、写真を撮影して検証を実施した。

6. 7. 1. カラーターゲットの設置

図 6.12 左は、実際にフィールドに設置したターゲットおよびカラーターゲットの全体配置を、同右はテストフィールドに設置した、それぞれのカラーターゲット部分を拡大した画像である。検出対象とした色は、赤紫、赤、青、水色、緑の5色である。これらは素材として入手可能なものから選択して、それぞれの色相角が比較的離散しているものを採用した。標準的な露光の画像では明瞭にそれぞれのターゲットを目視で識別できる。なお、赤紫および水色のターゲットは、屋外広告用カラーフィルムを、それ以外のターゲットは着色アクリル・アルミ複合板を用いている。計測用ソフトウェアでは、自動検出を実施する前に画像内のカラーターゲットを指定して探索色の代表値をセットし、同時に直近の白色ターゲットのIDをセットしている。



図 6.12 現地設置状況とカラーターゲット拡大図

後方交会法による単写真標定を実行するためには4点のターゲット位置を特定できれば十分ではあるが、他の構造物によりターゲットが隠ぺいされてしまう等の理由によりターゲットの1つが検出不調であった場合でも、他のターゲットにより単写真標定を実行できるよう、冗長性をもたせて5色のカラーター

ゲットを設置することとした。

なお、カラーターゲットの紫外線暴露による劣化退色については長期耐久性の検証が不十分であるため、退色の可能性は無視できないが、カラーターゲット自体の据付は簡易な方法を採用しているため、退色が見られた場合には、即時現場で交換ができるようになっている。システム的には、カラーターゲットの座標自体を保持せず、直近の計測用ターゲットを検出するようになっているため、現場で交換する際に、カラーターゲットを正確な位置にセットする必要が無く、取り付けを行う作業者のスキルも必要としない。

6. 7. 2. カラーターゲットの判別基準

図 6.13 は、図 6.12 のターゲット画像より抽出した赤紫 (MAGENTA) のターゲット周辺のピクセルについて色相値による頻度分布を示したものである。

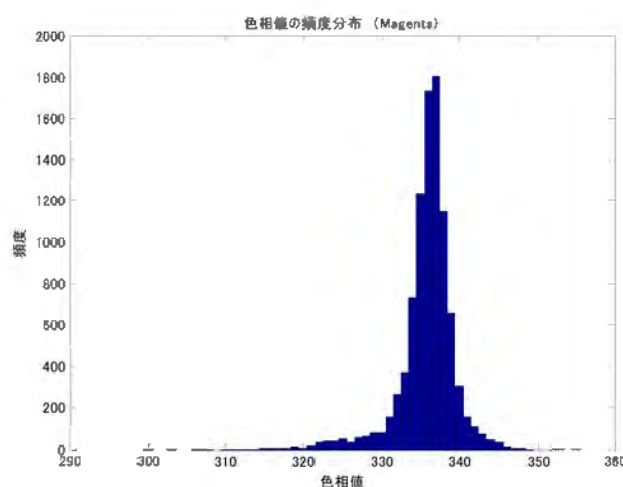


図6.13 色相値の頻度分布 (MAGENTA)

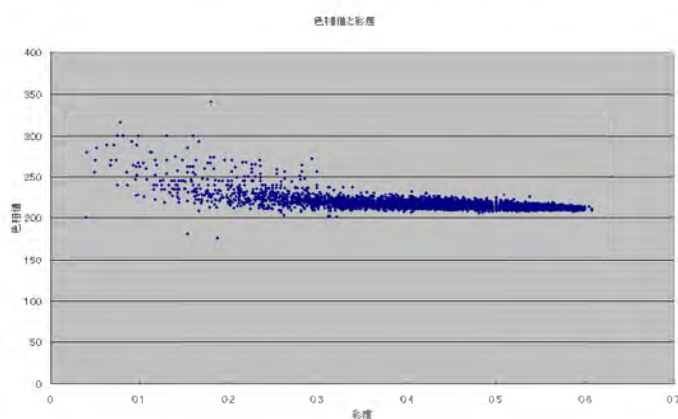


図6.14 色相値と彩度値の関係 (BLUE)

図より、色相値の分布は概ね正規分布していると判断できる。また、他の色についても標準偏差は異なるが、それぞれほぼ正規分布しているという結果が得られた。また、青色ターゲットを例にとりて、色相値と彩度値についての関係図を図 6. 14 に示す。

色相値は、ベクトルの方向角として定義されており、彩度が低下すると分解能が低下するため、バラつきが多くなる。図 6. 14 では、彩度値が 0. 3 以下 (MAX=1) になると分散傾向が明瞭になっていることがわかる。これは、ターゲット周辺部に黒枠を設置しており、画像取得時にカラーターゲット周辺部での明度低下を起こしているためである。特に、彩度はベクトルの角度として表現されるので、RGB の信号強度が低い場合、彩度の分解能が低下してしまう。

表 6. 2 は、彩度値の低いものをカットするというフィルタリングを行った後の色相値の統計量である。(CYAN を例に示しているが他の色もほぼ同様の結果となっている。)

表6.2 彩度によりフィルタリングした頻度分布 (CYAN)

	彩度カットレベル固定 (0.3)	最大彩度の50%以下を棄却
平均値 (度)	203.74	203.65
分散	18.79	16.32
標準偏差 (σ)	4.33	4.04

この結果より、彩度値の最大値の 50% 以下を棄却した結果の標準偏差をもとに 3σ 以内を採用するとすれば、類似色の判定域は ± 12 度 \rightarrow 約 $\pm 3.3\%$ となる。なお、実際のシステムでは、撮影した画像の 1 枚について、それぞれのカラーターゲットの教師値 (基準値) を指定し、他の画像について、同一色の検出を行う際のカラーターゲットの類似度の判定は色相値の 4% としている。

6. 7. 3. カラーターゲットの自動検出

図 6.15 にカラーターゲット検出結果 (RED) の画像を示す。画像中で赤く表示されている部分がカラーターゲット (RED) として認識された部分を示し、黄緑色で表示されている部分が白色ターゲットまたは無彩色で明度の高いもの（灰色～明灰色:彩度 (S) が小さいもの：主にコンクリート）を示している。

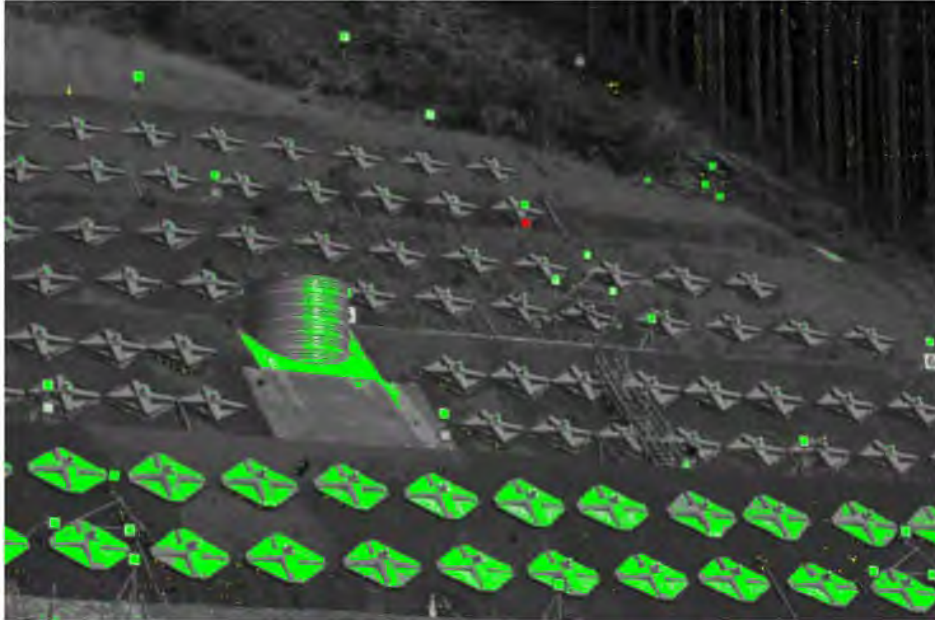


図 6.15 カラーターゲット検出状況 (RED)

図 6.16 は、実際の検出処理手順のフローチャートである。自動検出処理では、カラーターゲットを検出したあと、検出したカラーターゲットの近傍にある画像中の黄緑色の部分のうちターゲット形状に合致するものを探索し、その中心位置の画面座標（濃度重心）を算出している。

また、この処理では、画像上に同一の形状であり、かつ同一の色相の物体があった場合、画面中心に近い方の検出結果を対象ターゲットとして認定するようになっている。このため、広大な斜面において複数ブロックに分けて計測を実施するような場合、画面に複数の同一色ターゲットが撮影されていてもほとんどのケースで誤認識を回避できる。

本章の冒頭で示したように、カラーターゲットを用いる理由は、単写真標定の自動化を目的としている。人手の作業により単写真標定を実施する場合、4～5点のターゲットをマーキングする必要があるが、どのターゲットを選択するかは人間の判断に委ねられていた。しかし、画面上で広範囲に分散するようにターゲットをマーキングする場合と、特定の部分に集中してターゲットをマ

マーキングする場合、単写真標定結果の精度が異なる、すなわちカメラ初期値データの精度が不足してバンドル調整計算の結果に影響を及ぼす可能性が少なからず存在していた。カラーターゲットを用いることは、単写真標定においてマーキングするターゲットについても計画時に決定することを意味している。これにより、常に画像上で分散するようにターゲットをマーキングすることが可能となる。また、先に示したように単写真標定については4点を指定することで処理が可能である。カラーターゲットを5色検出することで、検出した5か所のターゲットから4点を選択する組み合わせは5通り存在する。この5通りについてそれぞれ単写真標定を実施し、この中で最小二乗誤差がもっとも小さいものを外部標定要素とすることで、さらに精度の高い外部標定要素を決定することが可能となる。このように、カラーターゲットを採用することは、ターゲットのマーキングの効率化と共に、カメラ外部標定要素の取得精度を向上させる点でも意義がある。

現場での適用事例の詳細は、第8章にまとめたが、以下にカラーターゲットによる自動検出を適用した場合の作業時間と従来の手作業による作業時間の変化を表6.3に示す。

表 6.3 作業時間の変化（画像枚数 28 枚）

		従来处理		本開発	
項目	備考	時間 (分)	比率 (%)	時間 (分)	比率 (%)
画像取得	28枚	60	26	60	53
画像取込	自動	20	9	20	18
ターゲット同定		130	57	14	12
解析計算	半自動	10	4	10	9
結果の検証	手動	5	2	5	4
前回値との比較	手動	5	2	5	4

表に示すとおり、従来2時間以上を要していた作業が、約15分で処理が完了するようになった。これは、さらに精度向上を求めるため写真枚数を増加させた場合に課題となっていた人的作業時間の減少とヒューマンエラーの低減化が達成できたことを示している。

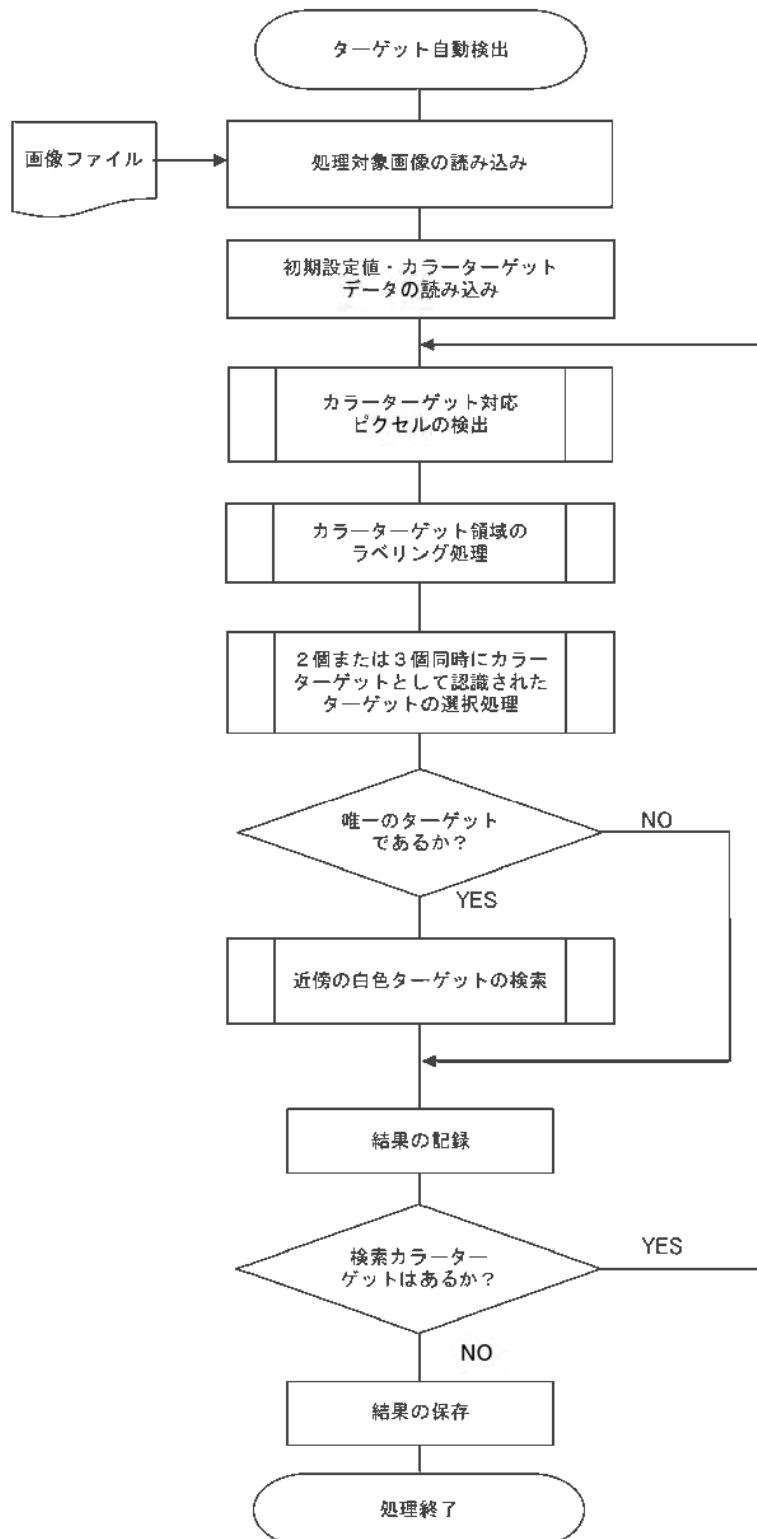


図 6.16 カラーターゲット自動検出処理手順

6. 8. まとめ

色の表記方法は用途・目的により多くの種類が存在するが、基本的には規格化するための手続きであり、印刷や商品の色を常に同じ表現で指定できるような絶対標準色を定義しようとするものである。

特定の条件化で撮影された画像の色情報は、環境光源の条件を取得していないかぎり、絶対色として同定することは出来ない。しかし、特定の環境下で撮影された複数の画像における同じ色のターゲットを探索する場合、絶対色として認識する必要は無く、相対的におなじ色値（情報）を抽出することが出来ればよい。RGB で表記される色情報を HSV 空間に投影することにより、同一光源下では色相値および彩度値をキーとしてターゲットの同定がスムーズに行われることが確認された。また、カラーターゲットの自動抽出によるターゲットナンバーリングの自動化が実現できたことで、実際の写真測量業務の作業時間の大幅な効率化が可能になった。

また、カラーターゲットを採用することは、ターゲットのマーキングの効率化と共に、カメラ外部標定要素の取得精度を向上させる点でも意義があることを確認した。

但し、夕方の遅い時刻や、荒天等で天候の状態が刻々と変化するような場合、環境光源自体の色温度が急速に変化するため、撮影時間が長くなると最初と最後で同じカラーターゲットを異なった色味のターゲットとして判定してしまうケースや、極端に露出が暗い画像については RGB の信号強度が小さくなり、色相値を RGB の強度からベクトルの角度に変換する際に分解能が悪くなって、判定不能となるケースも確認できた。

なお、実際の現場での適用事例と計測作業時間の比較については、第 8 章にまとめた。

参考文献

- (1) S. Hattori, K. Akimoto, A. Okamoto, H. Hasegawa and C. Fraser, 1999, "The Design and Use of Coded Targets for Automatic Measurement with a CCD Camera", Proc. of ASPRS (Americal Society of Photogrammetry and Remote Sensing), Portland, May, pp.928-935
- (2) 千々岩英彰, 2001, 色彩学概説, 東京大学出版会
- (3) K. Akimoto, C. S. Fraser, H. Hasegawa, and S. Hattori, 1998, "Comparison of free network solutions by the artificial basis-based method with one by the generalized inverse in video metrology," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXII, Part 5, Hakodate, pp.17-22
- (4) S. Hattori, and Y. Myint, 1995, "Automatic estimation of initial approximations of parameters for bundle adjustment," PE&RS, Vol. 61, No. 7, pp. 909-915

第7章 シミュレーターによる計測誤差の推定

7. 1. 概説

本章では、精密写真測量の撮影計画に準じて撮影を実施した計測データの解析計算結果について、その計算精度を推定するためのツールとして解析シミュレーション機能の原理を示した。また、基本のシステムにシミュレーション機能を追加し、実際のテストデータと比較して検証試験を実施した。

7. 2. 従来の問題点

これまで、精密写真測量による計測については、撮影計画を立案するに当たり、現場の状況によって撮影条件が異なるため従来は経験により設定されていた。また、ターゲットの設置・枚数の設定等についても明確な基準がなく、計測精度は、前章で示したような精度推定グラフより推定するより方法がなかった。しかし、実際に現地で撮影して解析結果を得るまでは、要求される計測精度を満たすような現場条件であるかどうかは、まったく判断できなかった。

計測精度が不足する場合には、追加で撮影位置を増やし、写真枚数を増やすことで対処していたが、現場によってはそれも限界があり、計画段階での精度推定ができるシミュレーション機能が切望されていた。

シミュレーション機能は計画したターゲット配置を撮影予定位置から撮影した想定画像上にターゲット位置をシミュレーションにより生成（ターゲットの2次元画像座標の生成）し、このデータを元に解析計算を実施することで、想定精度を算出するものである。

シミュレーション機能を利用することにより、撮影位置の適否や要求される内的精度に対して必要な写真枚数等を計画段階である程度効率的に決定できるとともに、撮影計画のバックデータとして現場に提供することで、実際の解析結果の良否の判断材料として効果的に利用できる。

7. 3. シミュレーションの原理

第3章で示したように精密写真測量では、画像上のターゲット位置（2次元）を取得し、後方交会法による単写真標定を行いカメラの外部標定要素（撮影位置および撮影方向角）を求めて、この結果と登録してあるターゲット3次元初期値データを元に後方投影処理を行い、画像上にターゲット推定位置を表示し、推定位置近傍のターゲットを画像処理により検出することでターゲットの画像座標を取得している。⁽¹⁾

この手順の中で、任意に設定した外部標定要素およびターゲット3次元座標をそれぞれ初期値として、ダミー画像にターゲットを後方投影で生成すると、任意に設定した外部標定要素で規定される位置から撮影したダミー画像を取得

することができる。ただし、このままでは、すべてのデータが定義された数値により生成された情報となるため、この結果を用いてバンドル調整計算を実施すると、結果は誤差0となってしまう。

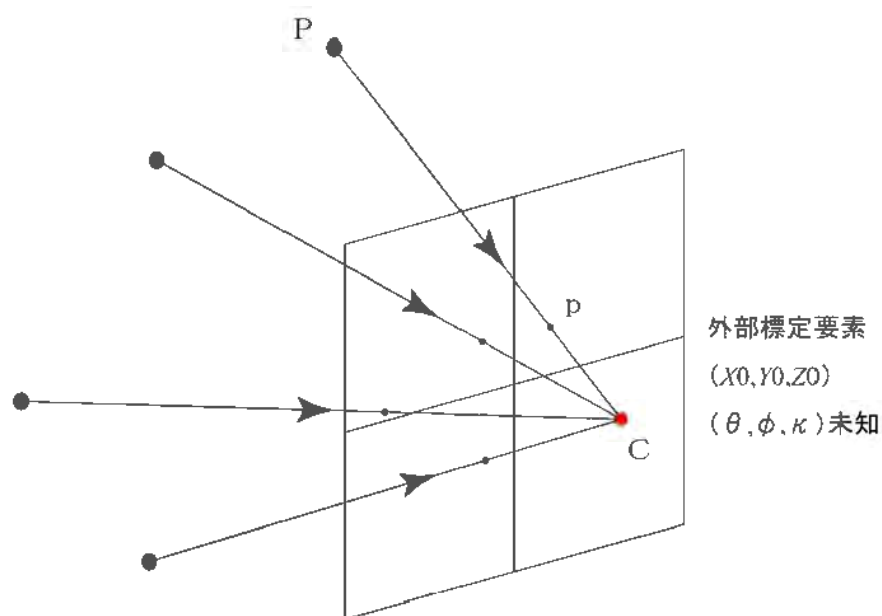


図 7.1 後方交会法のイメージ

実際の計測に於いては、単写真標定による外部標定要素（カメラ初期値）の計算誤差および画像上でターゲットの中心を決定する際の誤差が計測結果の誤差の要因となるため、これをシミュレートする必要がある。本研究におけるシミュレータは、このターゲット中心を決定する後方投影処理の実施結果（画像 XY 座標）に対して任意のレンジのノイズ（誤差）を与えることで、計測誤差と同様の効果が発生させようとするものである。

処理の実行手順の概要は以下の通りである。なお、事前にターゲットの 3 次元座標値（初期値または前回計測値）を設定しておく必要がある。

- ①ダミーのカメラ位置、方向角を与える
- ②ターゲットの 3 次元座標初期値を、カメラ撮像面での 2 次元座標に変換する
- ③ダミーの位置から撮影した画像上でのターゲット位置が得られる

算出したターゲット位置に想定される読取精度（およそ 0.1 ピクセル：可変）に相当する値をランダムなノイズとして与えることにより、実際に現地で計測する場合のおよその精度を推定することができる。

7. 4. シミュレーション実施手順

シミュレーション作業のフローは以下のとおりである。

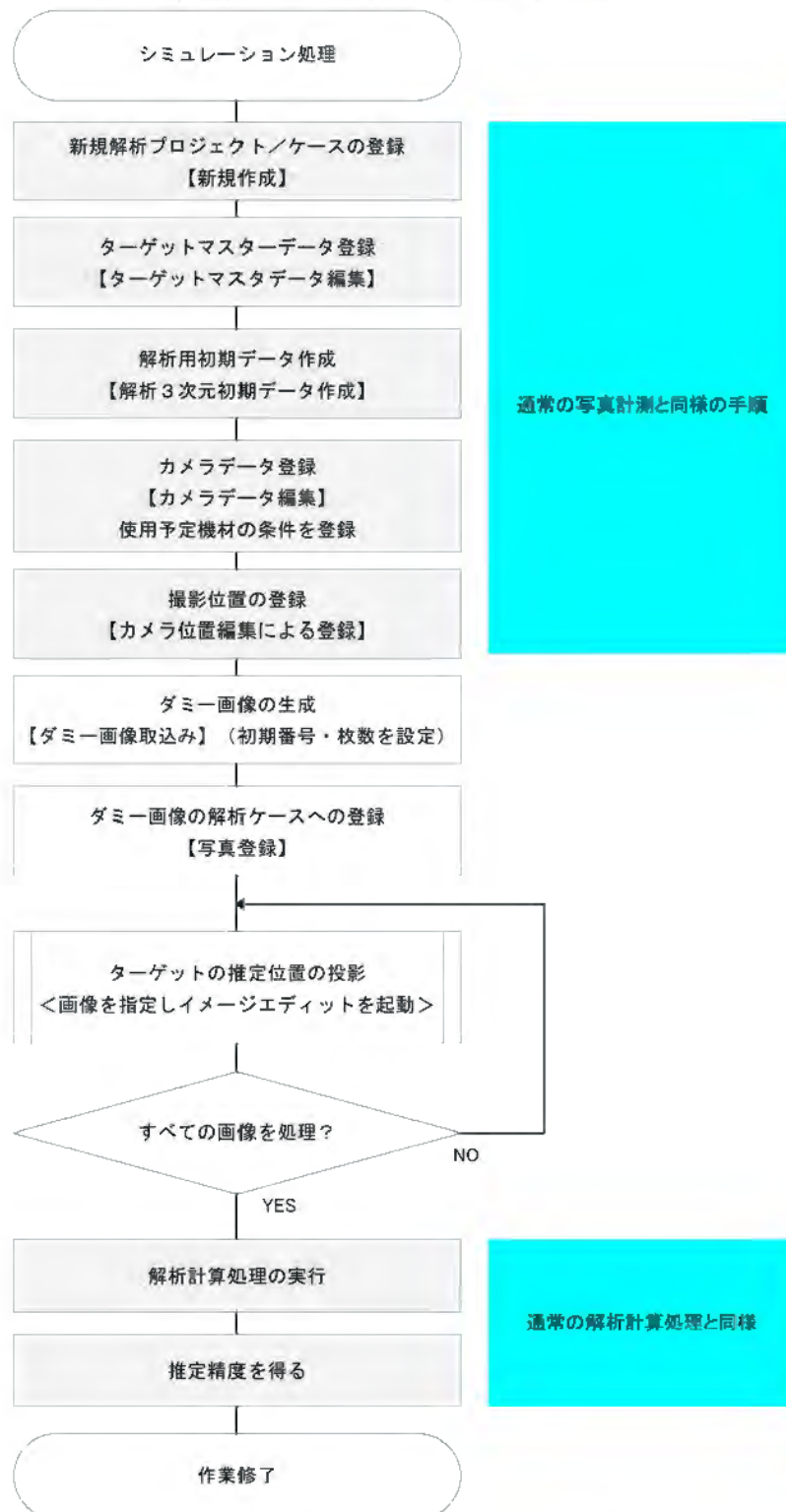


図 7.2 シミュレーションの作業フロー

なお、図中の「ターゲット推定位置の投影」については、以下のフローに示す。

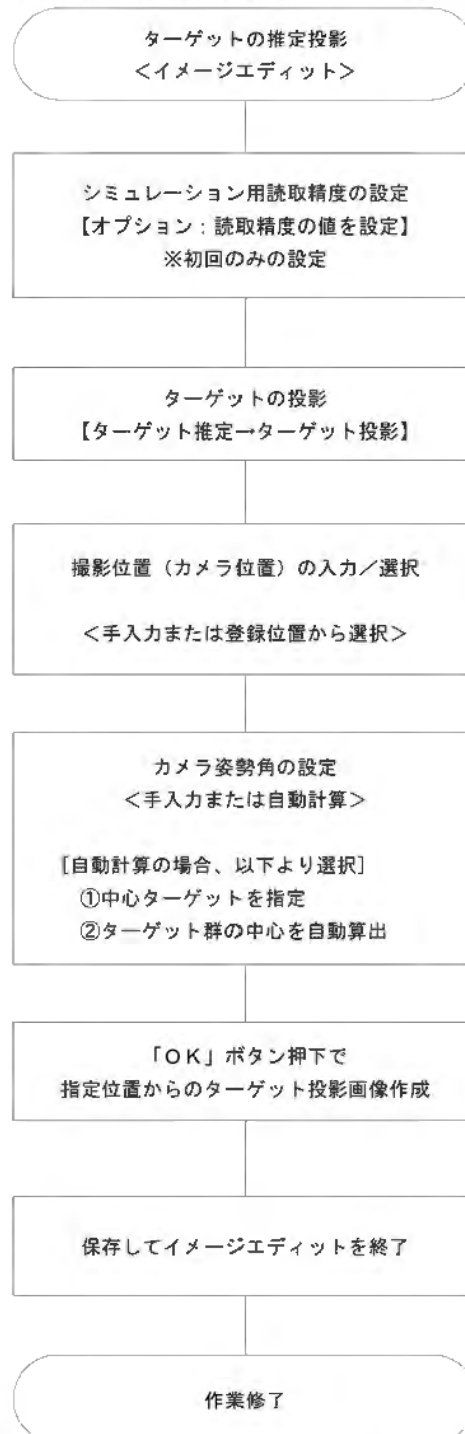


図 7.3 ターゲット投影の作業フロー

7. 5. プログラムによる作業

シミュレーション機能の作業フロー中の個々の作業方法は以下のとおりである。

①ダミー画像の生成

必要枚数のダミー画像を生成し、写真登録を行う。

また、読取精度に該当するノイズを与える量を設定する。

(ターゲット2次元座標計算時に与えたノイズを最大値とする
±の値が乱数により生成され加算される)

②登録した画像についてそれぞれ以下の③、④の処理を実施する。

③カメラ位置・方向角の設定

カメラの3次元座標および方向角、カメラ回転角を設定する。

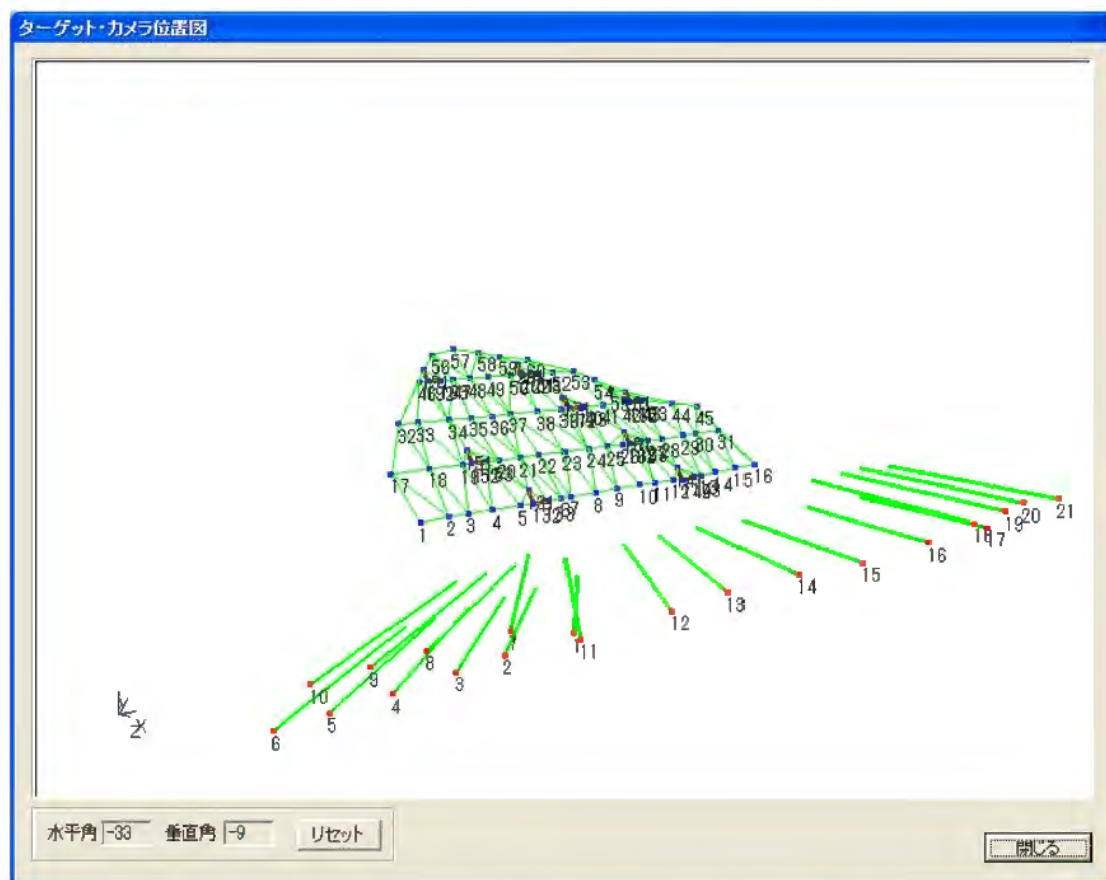


図 7.4 カメラ位置・方向角とターゲット初期値座標の確認画面

③推定ターゲット位置の計算

ターゲットの2次元画像座標を計算し、計算結果を画像上に表示する。



図 7.5 ダミー画像上のターゲット推定位置表示画面

⑤通常の解析計算と同様にバンドル調整計算を実施する

ダミー解析用データをすべて作成して、通常の解析計算を実施することで、想定される撮影位置からの画像による推定値によりターゲットの3次元座標を計算する。

⑥解析結果より想定される内的精度を求めることができる。

計算結果は、すべて推定値による計測結果を示している。
この結果により、実際に指定位置から撮影した場合の計算精度の推定が可能になる。

7. 6. 動作検証結果

既存の計測データ（カラーターゲット検出試験に用いた第二東名高速道路：静岡工事現場）より機知のターゲット3次元座標、カメラ位置を使用してシミュレーション機能の検証試験を実施した。

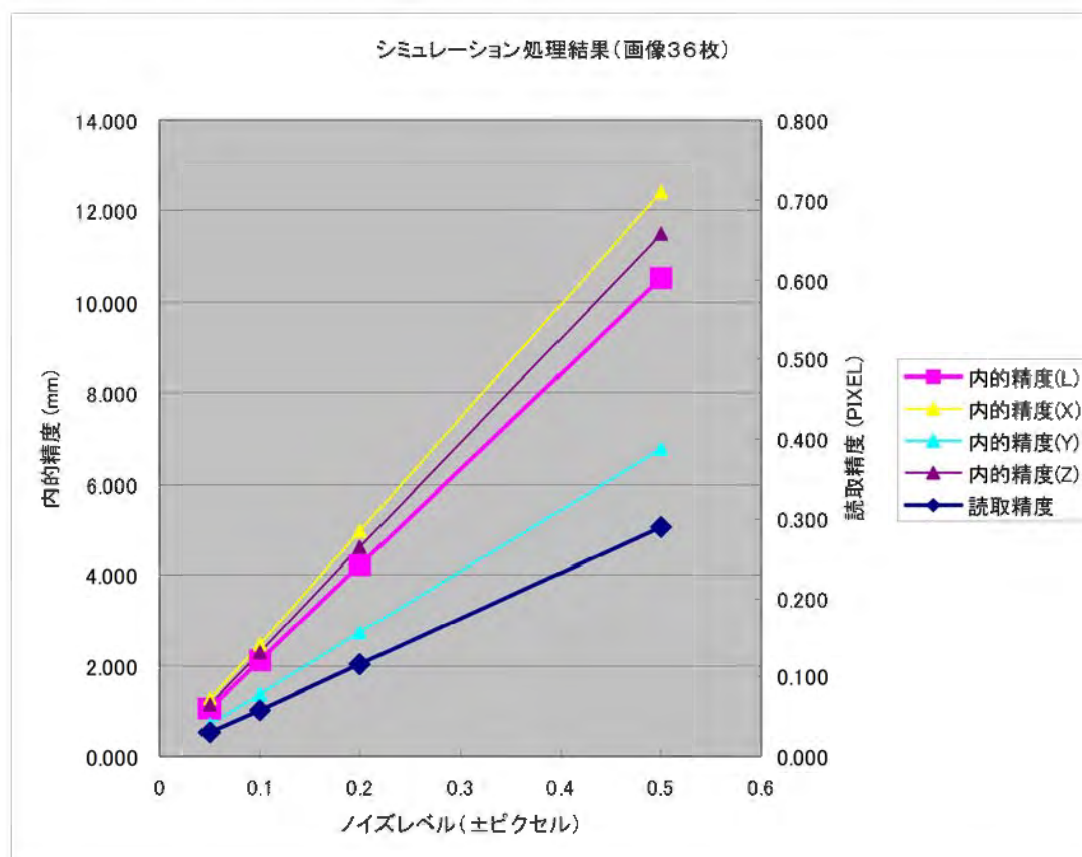


図 7.6 シミュレーション結果（ノイズレベルを変化させた場合）

図 7.6 は、現場のデータを元にシミュレーション機能により 36 枚のダミー画像を、与えるノイズレベルを、0.05, 0.1, 0.2, 0.5 ピクセルの 4 段階に変化させて 4 組生成した後、それぞれのデータをバンドル調整計算により解析処理を実施し、得られた結果から読取精度および内的精度を抽出してグラフ化したものである。

図中の内的精度 (L)、内的精度 (X)、内的精度 (Y)、内的精度 (Z) はそれぞれ、各ターゲットの計算残差の、ベクトル長さ(L)、X 方向、Y 方向、Z 方向の値をミリメートルで示し、読取精度についてはピクセル単位で示している。

また、表 7.1 は、それぞれの読取精度、内的精度の一覧表である。

表 7.1 シミュレーション結果（ノイズレベルを変化させた場合）

写真 36枚				
ノイズ ±0.05 PIXEL			ノイズ ±0.20 PIXEL	
[読取精度]		0.029 PIXEL	[読取精度]	0.116 PIXEL
[内的精度]	X	1.257 mm	[内的精度]	X 4.983 mm
	Y	0.688 mm		Y 2.728 mm
	Z	1.164 mm		Z 4.613 mm
	L	1.066 mm		L 4.225 mm
ノイズ ±0.10 PIXEL			ノイズ ±0.50 PIXEL	
[読取精度]		0.058 PIXEL	[読取精度]	0.289 PIXEL
[内的精度]	X	2.476 mm	[内的精度]	X 12.405 mm
	Y	1.356 mm		Y 6.787 mm
	Z	2.292 mm		Z 11.477 mm
	L	2.099 mm		L 10.515 mm

これらの結果より、下記の点が確認できる。

- ・与えるノイズレベルに対して、読取精度、内的精度、計算残差はリニアである
- ・読取精度値はノイズレベルの約 50%になっている
- ・現場の観測データと比較すると、画像よりターゲットの検出は 0.2 ピクセル程度のノイズと同等と推定される

次に、与えるノイズパターンとして一様分布ノイズ（ランダムノイズ）と正規分布ノイズの 2 通り作成し、それぞれの読み取り精度を比較した。

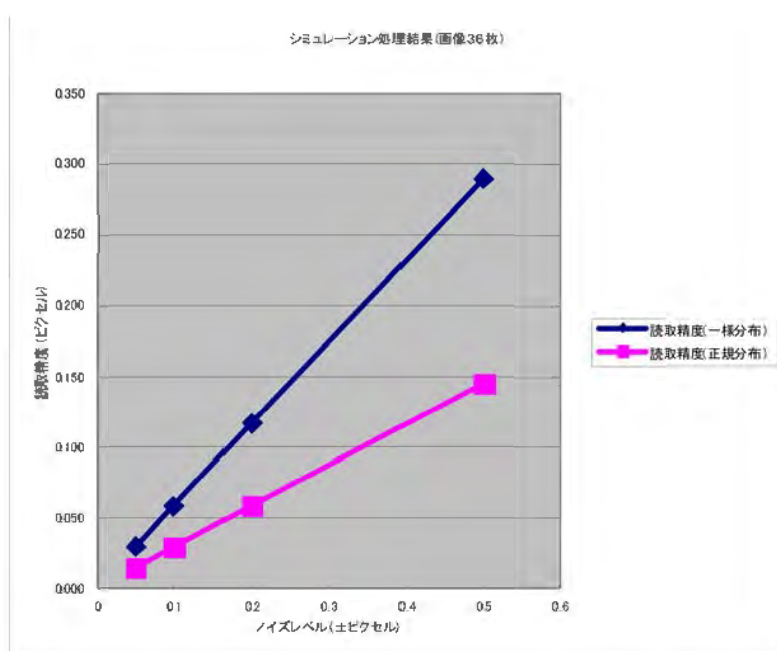


図 7.7 ノイズ種類によるシミュレーション結果の比較（内的精度）

図 7.7 から、一様分布のノイズに対して正規分布のノイズを与えた場合には、読取精度は、一様分布ノイズのほぼ 2 倍程度の精度向上となることが読み取れる。しかし、現場の実測結果と比較すると、より大きなノイズを与えてもシミュレーション結果の精度が良すぎるということになるため、実測結果と乖離することになる。そこで本研究におけるノイズの生成については一様ノイズを採用することとした。

図 7.8 はノイズレベルを一定 (± 0.10 ピクセル) として、写真枚数を変化させて読み取り精度および内的精度の変化を確認したものである。

図中の AV, SD, MAX, MIN, MED はそれぞれ、各ターゲットの計算残差 (長さ成分:L) の平均値、標準偏差、最大値、最小値、中央値を示す。

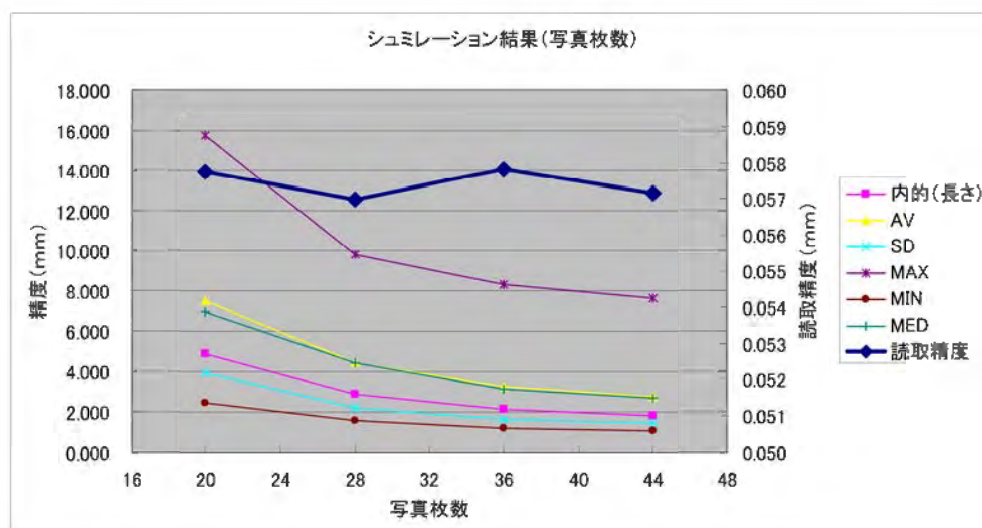


図 7.8 シミュレーション結果 (枚数を変化させたもの)

図から、

- ①写真枚数が 20 枚から 28 枚に増えると内的精度は 60%近く向上するが、それ以降は 8 枚ごとに増やしていても精度向上の度合いは低下していく。
 - ②読み取り精度は、写真枚数とは関係がなくほぼ一定である。
- といったことがわかる。

次に、実際に第 4 章の後半で示したフィールドテスト画像による解析結果を用いて、比較実験を行った結果を示す。表 7.2 は 12 パターンの解析ケースについて読取精度を比較したものである。ほぼすべてのケースで実測値とシミュレーションの結果は近似できる結果である。実測値との最大差分は 0.017 ピクセ

ルであり、実際のデータによる解析結果の読取精度のバラつきの方が大きいいため実用上問題はない。

表 7.2 実測値とシミュレーション結果の対比（1）

NO	テスト条件	画像	読取精度 (ピクセル)		差分 (ピクセル)
		枚数	実測値	シミュレーション結果	
1	画像72枚	72	0.064	0.057	0.007
2	右55度①($\sigma 1.5$)	36	0.044	0.054	-0.010
3	画像64枚	64	0.063	0.057	0.005
4	右55度①	36	0.053	0.057	-0.005
5	左右45度標準	36	0.055	0.057	-0.002
6	均等分布(右60度)	36	0.060	0.057	0.003
7	縦方向36枚	36	0.061	0.057	0.003
8	縦横36枚1	36	0.063	0.058	0.005
9	右60度両端集中	36	0.064	0.058	0.006
10	縦横36枚2	36	0.067	0.057	0.010
11	上下36枚	36	0.071	0.057	0.014
12	3方向集中2	36	0.075	0.058	0.017

表 7.3 実測値とシミュレーション結果の対比（2）

NO	テスト条件	解析枚数	内的精度[mm]								差分(絶対値)			
			実測値				シミュレーション結果							
			X	Y	Z	XYZ	X	Y	Z	XYZ	X	Y	Z	XYZ
1	画像72枚	72	0.185	0.162	0.076	0.148	0.172	0.152	0.072	0.139	0.013	0.010	0.005	0.010
2	右55度①($\sigma 1.5$)	36	0.191	0.164	0.070	0.151	0.240	0.201	0.087	0.188	0.049	0.037	0.017	0.037
3	画像64枚	64	0.186	0.168	0.081	0.152	0.178	0.162	0.079	0.146	0.008	0.006	0.003	0.006
4	右55度①	36	0.214	0.178	0.076	0.166	0.245	0.206	0.088	0.192	0.032	0.028	0.012	0.025
5	左右45度標準	36	0.213	0.190	0.089	0.173	0.238	0.213	0.098	0.193	0.025	0.023	0.009	0.020
6	均等分布(右60度)	36	0.243	0.208	0.097	0.193	0.242	0.208	0.099	0.193	0.001	0.000	0.001	0.000
7	縦方向36枚	36	0.245	0.216	0.101	0.197	0.243	0.215	0.101	0.196	0.002	0.001	0.000	0.001
8	縦横36枚1	36	0.255	0.224	0.107	0.206	0.249	0.219	0.104	0.201	0.007	0.005	0.003	0.005
9	右60度両端集中	36	0.265	0.220	0.092	0.206	0.252	0.209	0.088	0.195	0.014	0.011	0.004	0.011
10	縦横36枚2	36	0.274	0.241	0.114	0.221	0.243	0.214	0.101	0.196	0.031	0.027	0.013	0.025
11	上下36枚	36	0.287	0.251	0.118	0.230	0.241	0.213	0.101	0.195	0.046	0.037	0.017	0.036
12	3方向集中2	36	0.293	0.254	0.117	0.234	0.235	0.206	0.095	0.189	0.058	0.048	0.022	0.045

表 7.3 は同様に内的精度（計算精度）を比較したものである。こちらの結果も、すべてのケースで差異は 1/100mm のオーダーとなっており、特に XYZ（長さ成分）の差異は 0.02mm 以下のものが多く、それ以上の差異があるケースについても実測値の方が悪い値である。ただし、N02 のケースでは通常は異常値を 3 σ

として棄却している処理を実験的に 1.5σ として棄却した解析結果であるため、実測値の方が良い結果を示している。

さらに、実際の現場（カラーターゲット検出試験に用いた第二東名高速道路：静岡工事現場）で実施した計測結果との対比試験を実施した。実施環境等については第8章で示しているため、ここでは結果のみを示す。

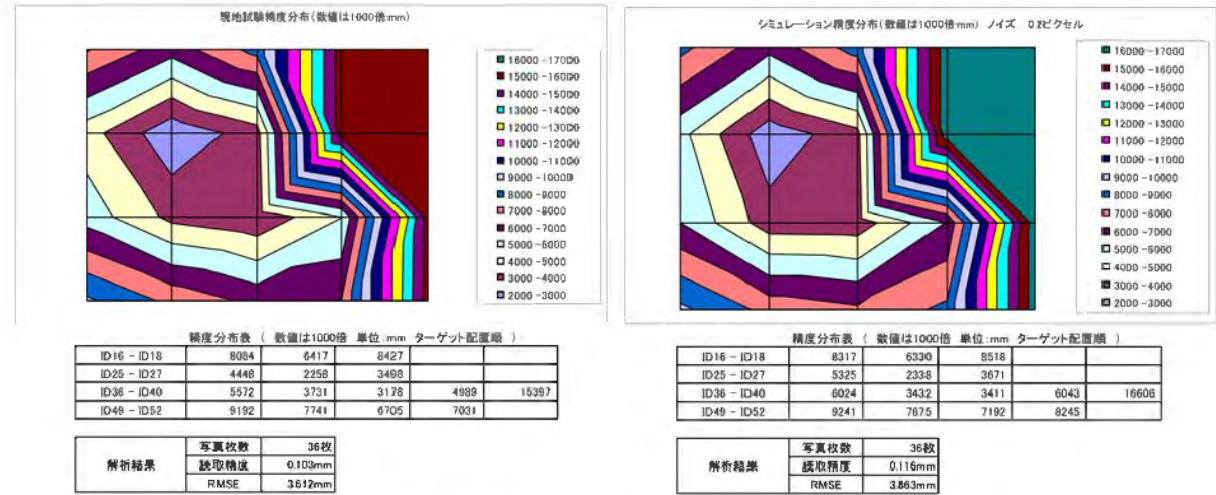


図 7.9 現場の計測結果とシミュレーション結果の比較

図 7.9 は現場の計測結果とその条件（ターゲット 3 次元座標・カメラ撮影位置・画像枚数）に合致させたシミュレーション結果について 2 次元に投影した各ターゲットの位置に誤差量（計算残差）をプロットして等値線を引いて比較したものである。グラフを比べてもほとんど差異がわからないほどよく似ており、現実のデータ同様中心から周辺に向かって精度が低下している状況がわかる。なお、この現場データでは、画面右上の部分には計測対象のターゲットが存在しないため中心がやや左に移動したいびつな形状になっているが、その形状も同様にトレースされている。

7. 7. まとめ

シミュレーション機能について、その検証結果をまとめると以下のとおりである。

- ・与えるノイズレベルに対して、読取精度、内的精度、計算残差はリニアである。
- ・読取精度値はノイズレベルの約 50%になっている
- ・既存の観測データと比較すると、画像よりターゲットの検出は 0.2 ピクセル程度のノイズと同等と推定される
- ・写真枚数が 20 枚から 28 枚に増えると内的精度は 60%近く向上するが、それ以降は 8 枚ごとに枚数を増やして解析していても精度向上の度合いは低下していく。
- ・読み取り精度は、写真枚数とは関係がなくほぼ一定である。
- ・与えるノイズは、ランダムノイズ（一様分布ノイズ）と正規分布ノイズを比較した結果、正規分布ノイズは実際の計測結果と乖離する。
- ・実際のテストデータにより対比実験を実施したが、実測結果とほぼ同様の精度値で計算結果を得ることが出来た。
- ・実際の現場観測と同様に、周囲に配置されるターゲットの計算残差は他に比べ大きくなっている。

これらの結果から、シミュレーションによる精度推定機能については、撮影計画におけるカメラ位置・撮影枚数を決定する際に、また現場での実際の計測結果の適否を判断する上で、適切なツールとして利用できることが確認できた。

また、この結果は、第 4 章で示した精度の経験式におけるネットワーク強度の定数を定量化することが可能となったことを示している。

参考文献

- (1) 村井俊治, 1983, 解析写真測量, 社団法人日本写真測量学会

第8章 現場への適用

8. 1. 概説

本章では、これまで述べてきた、「カラーターゲットによる処理の効率化（第6章）」および「シミュレーションによる事前の精度推定と撮影位置の決定（第7章）」について、実際の現場で実施した適用事例および結果を示したあと、実際の現場でのデータ管理方法について示す。

8. 2. カラーターゲットによる効率化の現場への適用

実際にのり面開削工事の施工管理に精密写真測量を使用している現場にカラーターゲットの追加設置を依頼し、処理効率の変化を計測した。

8. 2. 1. 計測位置と範囲

カラーターゲットによるテスト計測の対象範囲は、以下の平面図・縦断図内に示した赤枠の区域とした。いずれも、全対象区域の上段ブロックに属するため、ターゲットのサイズは、色部□400mm＋黒枠部□100mm×2＝全体□600mmとした。

使用したカメラは NikonD100(6M 画素：3008×2000)。撮影レンズは焦点距離50mmのマニュアルフォーカスレンズを用いた。撮影位置は事前に計画した場所から行い、通常の計測と同様の手順で撮影した。

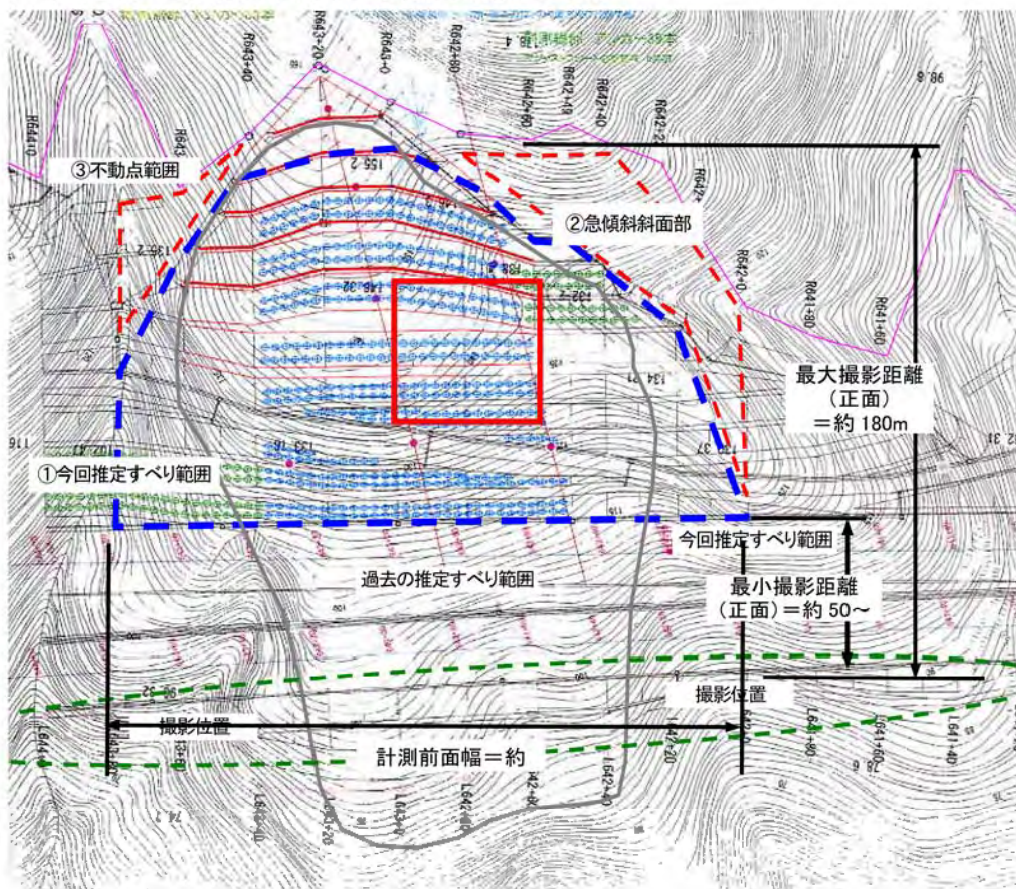


図 8.1 カラーターゲットによる計測範囲（平面図）

また、図 8.3 に実際のターゲットの設置状況および、カラーターゲットの位置（赤丸）について示した。

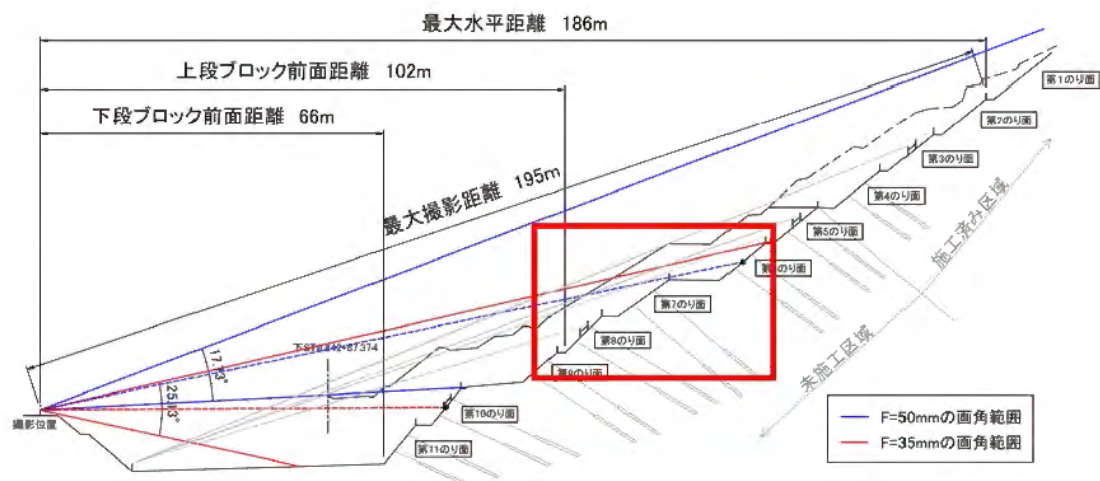


図 8.2 カラーターゲットによる計測範囲（縦断図）



図 8.3 カラーターゲット配置状況（赤丸）

8. 2. 2. 計測結果

実際に現地で撮影した3パターン[適正露光画像、露光不足画像(-1EV:適正値の50%)、露光不足画像(-1.5EV:適正値の約30%)]の画像について自動標定を実施した結果を表8.1に示す。なお、露光の適正値は各撮影ケースにより異なる。撮影ケース毎に、それぞれ反射型露出計により適正値を設定したが、撮影中は環境が大きく変化しない限り同一の設定値で撮影を実施した。

表 8.1 実施結果 (3回計測分)

画像No	通常露光			露光不足(50%)			露光不足(30%)		
	検出数	RMSE	RES	検出数	RMSE	RES	検出数	RMSE	RES
1	5	0.017	○	4	0.001	○	5	0.003	○
2	4	0.029	○	4	0.003	○	5	0.002	○
3	5	0.016	○	5	0.004	○	5	0.002	○
4	4	0.037	○	4	0.003	○	5	0.003	○
5	5	0.011	○	4	0.002	○	5	0.010	○
6	4	0.037	○	4	0.001	○	5	0.005	○
7	5	0.008	○	4	0.005	○	5	0.026	○
8	4	0.044	○	4	0.006	○	5	0.102	△
9	5	0.010	○	5	0.003	○	3		×
10	4	0.047	○	5	0.002	○	2		×
11	5	0.012	○	5	0.002	○	4	0.020	○
12	4	0.053	○	5	0.003	○	4	0.023	○
13	5	0.024	○	4	0.006	○	3		×
14	4	0.050	○	4	0.002	○	4	0.023	○
15	5	0.030	○	4	0.003	○	4	4.836	×
16	4	0.056	○	5	0.001	○	3		×
17	5	0.012	○	5	0.001	○	1		×
18	4	0.062	○	5	0.002	○	0		×
19	5	0.006	○	5	0.004	○	3		×
20	4	0.054	○	5	0.004	○	3		×
21	5	0.006	○	4	0.001	○	2		×
22	5	0.004	○	4	0.002	○	2		×
23	5	0.011	○	4	0.013	○	3		×
24	5	0.014	○	3		×	2		×
25	5	0.021	○	4	0.001	○	4	0.012	○
26	5	0.016	○	5	0.002	○	3		×
27	5	0.023	○	4	0.007	○	5	0.030	○
28	5	0.027	○	4	0.005	○	5	0.033	○
	RATE	28/28	100%	RATE	27/28	96%	RATE	14/28	50%

それぞれの画像の自動標定結果は、100%、96%、50%であった。これらの結果から、カラーターゲットによる自動標定は、通常または、やや暗めの画像（露光量が標準露光の50%程度まで）について十分に有効であると判断できる。最も条件の悪かった露光不足の画像[-1.5EV]は、撮影時刻も太陽高度の低くなった夕方での撮影であった。特に暗い色調である赤、緑のターゲットについては、目視でも視認することが難しく、アプリケーションでは、ほとんどの画像で検出することができなかった。(図 8.4)



図 8.4 不適格画像ターゲット拡大図
(露光量 -1.5EV)

また、夕方遅くの撮影では、1枚毎に画像の明度が異なり、撮影開始時と終了時の画像では撮影時刻に30分程度の時間差があったため、画像の明度が倍以上異なるものもあった。

このように、太陽高度が低く、照度が刻々と変化するような夕方の撮影においては、カラーターゲットの検出が難しくなることが確認されたが、早朝の撮影についても同様であろうことは容易に推定される。1回の撮影ごとに露出を確認し、適正な露出で撮影することができれば、この問題は回避できる可能性が高いが、作業効率を考慮するのであれば早朝・夕方の撮影はできるだけ回避するべきである。

8. 2. 3. カラーターゲットによる推定処理のまとめと問題点

表 8.2 作業時間の変化（画像枚数 28 枚）

項目	備考	従来処理		本開発	
		時間 (分)	比率 (%)	時間 (分)	比率 (%)
画像取得	28枚	60	26	60	53
画像取込	自動	20	9	20	18
ターゲット同定		130	57	14	12
解析計算	半自動	10	4	10	9
結果の検証	手動	5	2	5	4
前回値との比較	手動	5	2	5	4

表 8.2 は、第 6 章の表 6.1 を基準として今回の改良を実施した結果の作業時間配分を改良前と比較したものである。カラーターゲットを自動推定して自動実行させることにより、従来の作業では全体の 57%を要していたカメラ外部標定およびターゲットの標定作業が 12%程度にまで短縮させることができた。これは屋内作業だけで見れば、約 90%の作業時間短縮を達成したことを示している。

また、認識が不調であった露光不足の画像についてもターゲットを 2 個から 3 個は検出できおり、計測用ソフトウェアで画像を開き、認識できたカラーターゲットを呼び出し、不足のターゲット（1 点から 2 点）を指定することで、自動標定を実施させることができるため、作業時間短縮という意味では全くの無駄にはなっていない。

カラーターゲットの検出は、日中における撮影では、非常に高い信頼度で実施できることが確認されたが、夕方や早朝の撮影においては画像毎の明度の変化が大きく、また光源のスペクトルが大気屈折により変化するためカラーターゲット検出には不向きである。また、太陽高度の低い夕方に撮影された画像では、ターゲット面の位置と太陽の位置関係から撮影画像が太陽光の直接反射を受ける位置にあったため色情報が他の撮影位置からの画像とかけはなれた値を示すものがあった。これは、ターゲット表面が光沢面であり、太陽光の直接反射によって本来のターゲットの色を取得できなかったためである。この結果からカラーターゲットの材質および表面の性状については配慮する必要があるという課題を確認できた。さらに、全体にグリーンのターゲットが取得しにくい状況が多かったが、反射塗料としての緑は反射光量が十分ではないため露光量が不足した画像においては検出対象として不向きであることがわかった。

また、カラーターゲットの紫外線暴露による退色については長期間の検証が必要であり、今後も継続してテストが必要である。

ターゲット標定から解析計算に至る全過程を自動化すればさらに効率は向上すると推定することは容易であろう。しかし、実際には撮影位置とターゲットの設置状況から、ターゲットが重複して撮影されてしまうケースや、現地の植生等の影響によりターゲットが隠蔽されてしまい、画面に上で検出できないケースも多く発生する。このような状況にある画像データについて、自動標定後に結果の確認を実施しないで解析計算処理をおこなっても、結局は期待する結果を得ることができずに再解析となり、手戻りになってしまうことになる。

精密写真測量におけるターゲットの標定作業は、その結果が計測値のすべてであり、解析計算処理の結果および精度に大きく影響するため、人間によるチェック作業は欠くことができない。

8. 3. シミュレーションによる精度検討の現場への適用

前項で示した現場において、計画時に決定した撮影位置から撮影した実際の画像による解析結果と、同じ撮影位置から撮影した設定でのシミュレーションによる解析結果の比較を行った。

以下に現地解析結果の精度分布を示す。対象としたターゲットは図中に青丸で示したものである。



図 8.5 ターゲット配置
(基準尺ターゲットの ID は省略 15, 24, 35, 48 は対象外)

図 8.6 は現地のデータを元に解析作業を実施した結果である。図 8.7 は、実際に撮影した場所とほぼ同じ位置から撮影した状態を想定して、シミュレーションにより生成した擬似データを解析した結果である。

使用した写真は 36 枚で、ターゲット画像座標のシミュレーションには 0.2 ピクセルの検出ノイズを与えている。それぞれ図を比較すると誤差分布パターンは非常に近似しており、読取精度および内的精度もほぼ同様の値を示している。

この結果から、シミュレーションによる精度予想は、撮影位置の変更または追加により精度向上が可能かどうかの判定に実用上問題がないことを確認した。

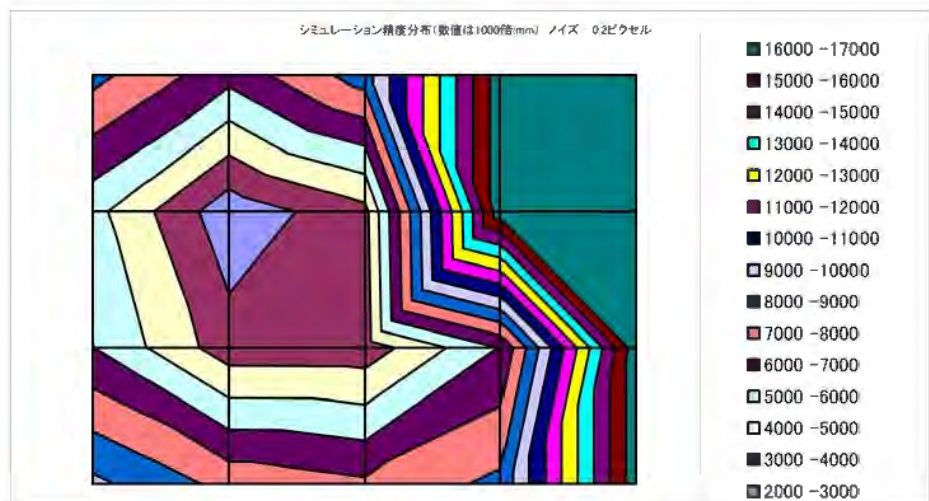


精度分布表 (数値は1000倍 単位:mm ターゲット配置順)

ID16 - ID18	8084	6417	8427		
ID25 - ID27	4448	2258	3498		
ID36 - ID40	5572	3731	3178	4989	15397
ID49 - ID52	9192	7741	6705	7031	

解析結果	写真枚数	36枚
	読取精度	0.103mm
	RMSE	3.612mm

図 8.6 現地試験精度分布図



精度分布表 (数値は1000倍 単位:mm ターゲット配置順)

ID16 - ID18	8317	6330	8518		
ID25 - ID27	5325	2338	3671		
ID36 - ID40	6024	3432	3411	6043	16606
ID49 - ID52	9241	7675	7192	8245	

解析結果	写真枚数	36枚
	読取精度	0.116mm
	RMSE	3.863mm

図 8.7 シミュレーションによる精度分布図

8. 4. 施工現場における精度向上策の検討

前出の施工現場に於いては、当初計画通りの精度が得られずに計画の変更を余儀なくされた。シミュレーターのテスト運用を実施する前は、試行錯誤による措置として、写真枚数を増加させる提案を実施し、当初予定の 48 枚から 60 枚、76 枚に段階的に枚数を増加させてその結果を比較したが、期待通りの結果を得ることができなかった。(第 1 回計測から第 5 回計測)

表 8.3 現場計測結果の比較

計測実施日	撮影箇所	読取精度 (PIXEL)	計算精度				写真枚数
			X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	L (mm)	
第1回(5月25日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.16	6.49	4.14	7.34	6.15	60
第4回(7月21日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.24	7.21	4.91	8.55	7.05	76
第6回(8月31日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.12	2.71	1.84	3.18	2.63	76
第9回(10月28日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.13	2.85	1.95	3.46	2.82	76

シミュレーターを開発して、この現場のデータを解析した結果およびテストフィールドで精度検証を実施した結果、写真枚数は同じ(76 枚)でも、1 地点で回転させながら 4 枚撮影するのではなく上下位置で 2 枚撮影し、撮影ポイントを増加させることで精度が向上できるということを推定することができた。

この結果を元に現場での撮影計画を変更して、撮影位置を増やして計測を実施した結果(第 6 回計測から第 11 回計測)、それまでの計測結果と比較して 2 倍以上よい精度での計測を実施することが可能になった。

表 8.3 に計測結果の比較を、図 8.8 (A) および図 8.8 (B) に撮影位置の変更状況をそれぞれ示す。

これによりシミュレーション機能が精度向上のための強力なツールとなることが確認された。

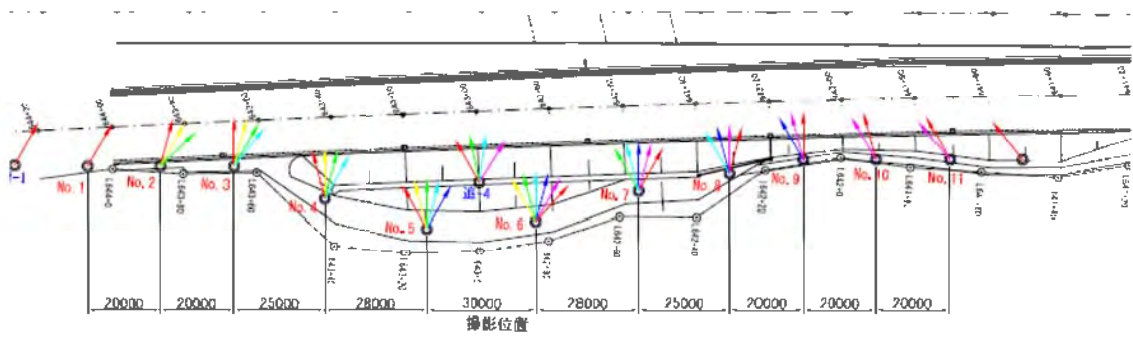


図 8.8(A) 撮影位置 (第 1 回計測—第 5 回計測)

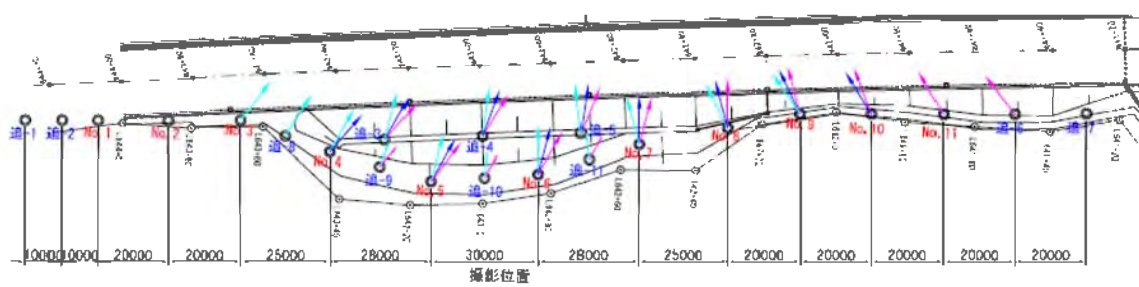


図 8.8(B) 撮影位置 (第 6 回計測—第 11 回計測)

8. 5. 施工現場における変位計測

カラーターゲットを設置した現場は、顕著な変位の傾向は予想されなかったため、計測結果の管理を面ひずみにより実施することとした。

以下にその評価の管理基準を示す。

- ① 写真計測におけるのり面の評価は、2回の計測結果の比較で得られる「面ひずみ量(%)」を用いるものとし、比較対象は原則として、最新の計測結果を基準に前回および前々回とする。
- ② 「面ひずみ量 (%)」での評価基準は、下表のとおりとし、前回および前々回計測比較における、1回以上の出現値（大きい方の値）で評価する。
- ③ 「対策の検討」以上の対応区分については、実際には「観測強化」を経た後に決定するものであるため、評価基準としては参考扱いとする。

表 8.4 に面ひずみ量 (%) による評価の管理基準値を示す。

表 8.4 面ひずみ量 (%) による評価基準

面ひずみ量 (%)	±0.1未満	±0.1～0.3	±0.3～0.5	±0.5～1.0	±1.0以上
対応区分	OK	経過観察	観測強化	(対策の検討)	(警戒・応急対策)

また、本現場では写真測量以外の計測も実施しており、総合的な判断基準と追加計測・点検の実施基準についての案を作成し、これに基づいた運用管理を試験的に実施した。

表 8.5 写真測量・他計測結果による評価基準と対応区分（案）

写真計測			他計測・点検					総合評価		備考
評価区分		対応	実施区分				評価区分	評価区分※4 写真・他計測・点検の結果による評価	対応区分	
面ひずみ量% ※1	単独評価での 対応区分※2		目視 点検	地中 傾斜計	アンカー 荷重計	追加 地表面計測				
0.1未満	OK	—	—	実施	実施	—	①変状・変位の 兆候なし	OK・兆候なし	OK	
0.1～0.3	経過観察	目視点検追加	追加 実施	〃	〃	—	②変状・変位の 軽微な兆候あり	観測強化・軽微な兆 候：該当1個以下	経過観察	
0.3～0.5	観測強化	〃	〃	〃	〃	—	③変状・変位の 明確な兆候あり	観測強化・軽微な兆 候：該当2個以上	観測強化	
0.5～1.0	(対策の検討) ※3	他の地表面計測手 法等の追加を検討	〃	〃	〃	状況により 追加実施	〔管理基準を別途 定めている場合 は、それによる〕	対策の検討・明確な 兆候：該当2個以上	(対策の検討) ※3	
1.0以上	(警戒・応急対策) ※3	〃	〃	〃	〃	〃		明確な兆候の 程度により	(警戒・応急対策) ※3	

※1: 前回・前々回の2回の比較における、1回以上の出現値

※2: 面ひずみ量の評価は、解析誤差(残差量)を考慮して行う

※3: 1測点等で大きなひずみ量が発生した場合には、ターゲットへの接触・移動の可能性がある

※4: 「対策の検討」以上の対応区分については、実際には「観測強化」を経た後に決定するものであるため、評価基準としては参考扱いとする

※5: 総合評価において、近傍に他計測箇所が無い場合には、写真計測および目視点検の結果で評価を行う

また、上記に基づいてモニタリングを実施した記録を表 8.6 に、実際の変位計測データのサンプルを図 8.9 にそれぞれ示した。

表 8.6 施工現場における変位計測（実施記録）

1. 計測概要

計測実施日と解析精度及び判定結果

計測実施日	撮影箇所	撮影精度 (PIXEL)	計算精度				写真枚数	計測結果 (上段・前段比較 下段・前段比較)			備考
			X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	L (mm)		実測計測	他計測	総合評価	
第1回(5月25日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.10	8.49	4.14	7.34	6.15	60	-	-	-	
第2回(6月28日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.33	12.58	8.07	15.59	12.70	30	経路観察	点検なし	OK・点検なし	画像不鮮明
第3回(7月 6日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.22	8.74	5.66	8.94	6.31	60	経路観察	点検なし	OK・点検なし	
第4回(7月21日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.24	7.21	4.81	8.55	7.05	78	経路観察	点検なし	OK・点検なし	第4回目以降撮影条件変更 No.10支柱測上げ
第5回(7月29日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.24	8.15	5.70	8.99	8.14	78	経路観察	点検なし	OK・点検なし	
第6回(8月31日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.12	2.71	1.84	3.18	2.63	78	経路観察	点検なし	OK・点検なし	第6回目以降撮影条件変更 基準尺測上げ
第7回(9月24日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.13	2.85	2.07	3.68	2.97	78	経路観察	点検なし	OK・点検なし	
第8回(10月3日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.13	3.07	2.08	3.81	2.89	72	経路観察	点検なし	OK・点検なし	
第9回(10月26日)	上段1-3ブロック (第3-8のり面左側)	0.13	3.14	2.00	3.88	3.04	78	OK	点検なし	OK・点検なし	対象ブロック初回計測
第10回(11月15日)	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.13	2.85	1.90	3.66	2.82	78	経路観察	点検なし	OK・点検なし	
第11回(11月28日)	上段1-3ブロック (第3-8のり面左側)	0.11	2.87	1.92	3.65	2.82	78	経路観察	点検なし	OK・点検なし	
	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.12	2.81	1.82	3.21	2.81	78	OK	点検なし	OK・点検なし	
	上段1-3ブロック (第3-8のり面左側)	0.12	3.05	1.88	3.58	2.93	78	OK	点検なし	OK・点検なし	
	上段4-6ブロック (第3-8のり面右側)	0.12	2.75	1.81	3.38	2.74	78	OK	点検なし	OK・点検なし	
	下段7-9ブロック (第8-11のり面右側)	0.17	3.88	1.24	2.74	2.85	79	-	-	-	対象ブロック初回計測(初回のみ)
	下段15-17ブロック (第8-11のり面右側)	0.14	4.41	1.21	3.21	2.44	98	-	-	-	対象ブロック初回計測(初回のみ)

各計測日の比較対象 一覧

基準計測日	比較対象日	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回
第1回(5月25日)											
第2回(6月28日)		○									
第3回(7月 6日)		○	○								
第4回(7月21日)			○	○							
第5回(7月29日)				○	○						
第6回(8月31日)					○	○					
第7回(9月24日)						○	○				
第8回(10月3日)							○	○			
第9回(10月26日)								○	○		
第10回(11月15日)									○	○	
第11回(11月28日)										○	○

第6回計測結果 上段4-6ブロック(第3-8のり面右側)

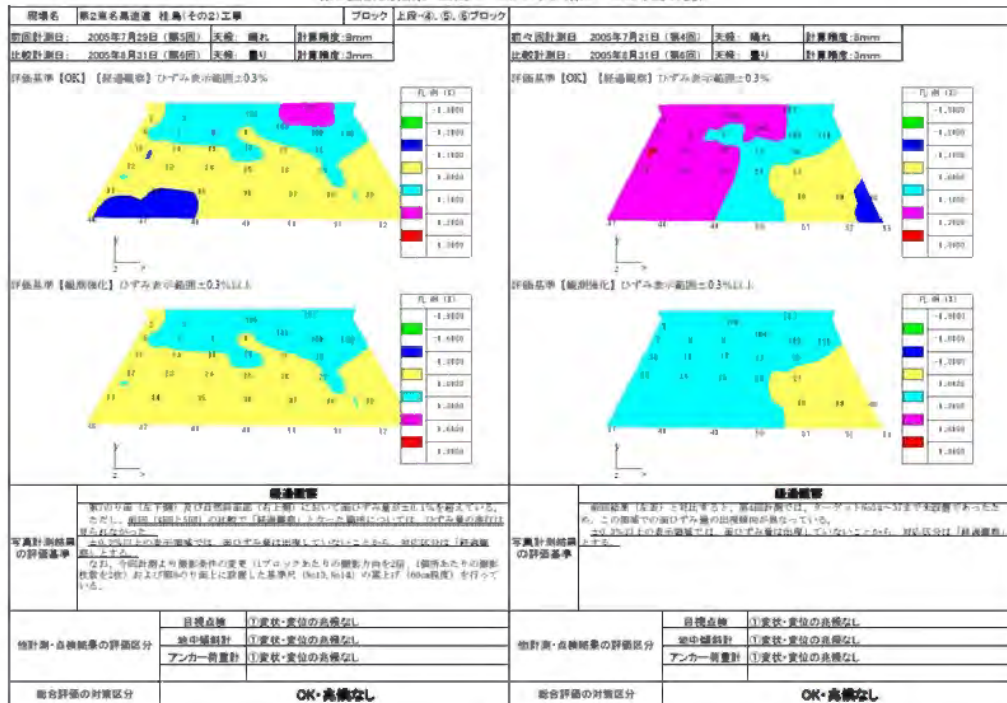


図 8.9 施工現場における変位計測（サンプルデータ）

8. 6. まとめ

現場にて実際に写真測量による変位計測の運用を行い、作業手順やシステムの操作手順に改良の余地はあるものの、得られた結果については、実用に十分耐えることが確認できた。特に、カラーターゲットの導入による処理の効率化は、無人処理の時間を要するものの作業者の拘束時間の低減という点では非常に有効であった。また、カラーターゲットによる自動検出を採用することにより、カメラ外部標定要素の算出についても、従来は漠然とした運用方法であったものが、計画立案時に立案者の意図により、実行方法を規定することを可能にした。

従来はターゲットを設置し、実際に撮影して解析結果を確認するまで、どの程度の内的精度で計測できるかは不明であり、計画の妥当性を判断する手段がなかった。このため現場において想定する精度が得られない場合には写真枚数を増加させることにより精度を向上させるような取り組みを行っていた。

しかし、シミュレーションにより撮影パターンを検証し、単に枚数を増加させるだけではなく、撮影位置を追加して、撮影パターンを多様化させ、1か所あたり4枚撮影していたものを2枚にすることで、計測精度を向上させることができることを推定し、実際の計測においても精度が向上することが確認できた。これによりシミュレーションがターゲットの配置および撮影位置の決定に有効なツールとなることが確認された。

これらの結果により、精密写真測量が土木分野で普及しない障害とされている2つの課題についてクリアすることができ、高速道路の管理対象のり面監視業務の手法として複数の現場において正式に運用されることとなった。

なお、計測結果の管理に関して、面ひずみによる管理基準の採用と、これを利用した危険度判定については、その有効性を確認したものの、第5章で示したように、地山の物性値との関連については考慮されていないのが現状である。土質的な物性値と面ひずみの関連についてはさらに検討が必要である。

第9章 まとめ

9. 1. まとめ

本研究では、精密写真測量の土木分野へ普及させるための障害となっていた次の問題点の解決に取り組んだ。

1. 収束撮影が困難なため、写真撮影の位置を特定することなく、できるだけ数多くの撮影可能な位置から多数の写真を撮影するという試行錯誤による精度向上を図っていた

これは、現場毎に撮影条件が変わるため、過去の撮影条件がノウハウとして蓄積されず、結果的に現場毎に試行錯誤するしか手段がなかった。

2. 収束撮影が困難なため、写真枚数を多くして精度を確保する必要があった

その結果、解析時のターゲットの同定あるいは初期値の取得に要する作業の効率が著しく低下し、結果として精密写真測量の普及を妨げていた。

これらの問題点に対して、本研究では以下のような解決策を適用することを検討し、その効果を実証した。

1. カラーターゲットによるターゲットの自動同定および初期値の自動取得を実現し、作業効率が向上した

これにより、写真枚数が多い場合でも処理にかかる労力は低減でき、またフリーハンドで撮影できる利便性を保持することができた。

2. シミュレーション機能による撮影計画の策定が可能になった

これにより、精度向上に対して、単に撮影枚数を増やせばいいのか、撮影位置を変更するのか等の検討をあらかじめ実施することができ、ネットワーク強度というパラメータを定量化させることができた。

これらの効果により、光軸方向の精度劣化に対して撮影計画ならびに撮影枚数を増やすことによる対策方法の実現を容易にした。

以上、本研究の成果により精密写真測量を土木分野に普及させることを実現した。

9. 2. 課題

①CCD の配置と読取精度の関係について

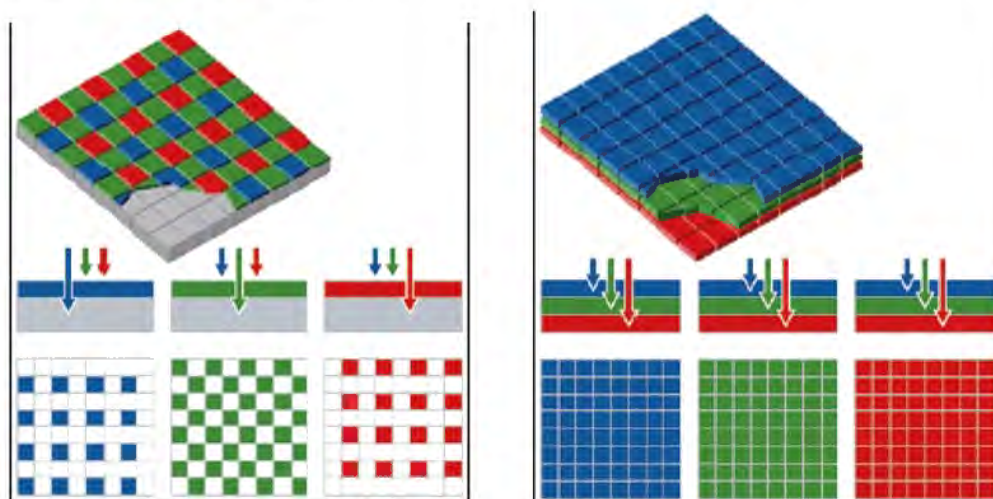


図 9.1 Bayer レイアウトフィルター

Foveon 素子

現在、我々が入手できるほとんどのデジタルカメラは、Bayer 方式と呼ばれるフィルター配置により、離散的に RGB の値を得て、CCD から出力されたデータをカメラ内部で処理してカラー画像としている。(図 9.1)

この配置の CCD は、空間周波数の高い画像（白黒の縞、ターゲットの縁）を撮影する場合に、色ずれを発生することが知られている。また、受光部がフィルターによりマスクされるため CCD を励起する光子は平均して $1/3$ の量になるため、CCD の 1 画素のサイズを小さくすることができない。我々が標準として使用している Nikon D100 では、CCD の入射光量を確保するため細長い短冊状のフィルターを装備している。実際にカメラから出力された画像は補正が完了しているため、1 画素が正方形となっているが、CCD 上の座標位置を正確に反映しているわけではない。

しかし、世界で唯一（2007 年 7 月現在）、3 層構造をもつ CCD を採用したカメラが Sigma XD14 である。この CCD は Foveon 素子とよばれ、セラミックの光透過特性を利用した色分解機能を持つ CCD である。セラミックに光が入射すると波長の短い青い光よりも波長の長い赤い光の方がより深層部まで到達する。Foveon 素子は、この原理を利用し、単位面積当たりの光電変換能力を高めたセンサーであり、センサーレイアウト形状を考えると、これは、全く写真測量的ために開発された素子と考えてもおかしくない。

Foveon 素子と Bayer 配列の素子を比較したデータを図 9.2 に示す。

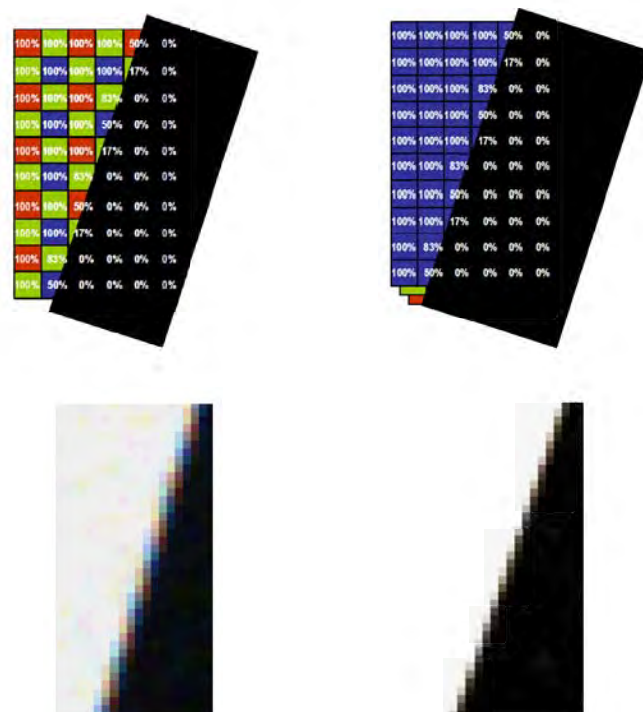


図 9.2 白黒パターン撮影時の境界での色にじみ比較（右 Foveon 素子）

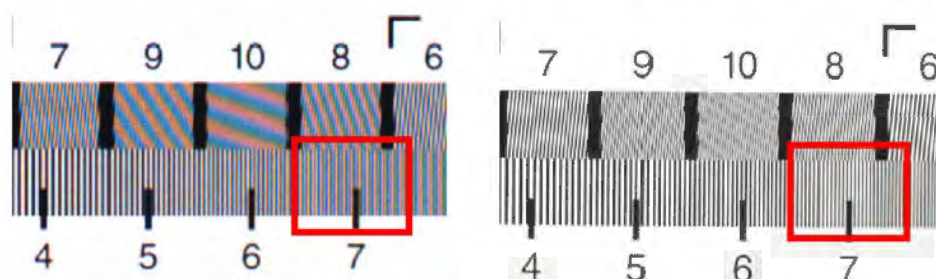


図 9.3 高周波パターンの偽色の発生（右は Foveon 素子）

現在、カラーターゲットの検出およびターゲット中心位置の画像処理による検出等をソフトウェアにより実施している。ターゲットの中心位置検出は、画像データを RGB の各チャンネルに分解し、いずれかのチャンネルをユーザーが選択して実行するようになっている。現状でも、拡大した画像のターゲット周辺での色にじみの発生や、高精細度 CCD の形状が、高密度化のために正方形ではなく長方形となっており、カメラ内部でデジタル保存時に補正されているなど、センサー部分のブラックボックス的な処理がカメラ内部で行われており、それらが問題点となりうる可能性は十分承知していたが、これを代替できるものがなかったため、半ばあきらめていた経緯がある。

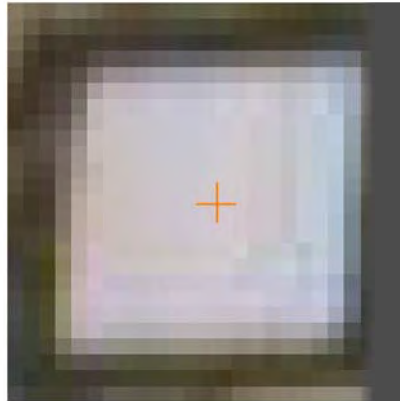


図 9.4 ターゲット拡大図

しかし Foveon 素子を装備したデジタルカメラによる精密写真測量では、読取精度のさらなる向上が期待できると考えている。

②各ターゲット座標の残差の分布について

平面に広がるターゲットを写真測量により計測する場合には中央部の残差量が小さく、周辺になるに従って残差量が多くなる傾向が確認されている。これは、内的精度が高い場合も低い場合も同様に生じており、その度合いが異なるだけである。

これがバンドル調整計算の特性であるのか、周辺部の精度低下を低減させるターゲット配置または撮影方法があるのか、という点については、さらに検証と確認が必要である。

③面ひずみの考え方について

面ひずみについては、ターゲット間の変位量のみを念頭において、その結果を評価していた。しかし、実際の現場に於いては変位量の大小が直接危険に結びつくわけではなく、モニタリング対象となるのり面の土質的な物性との兼ね合いにより、小さな変位であっても十分に危険が予測される場合と、大きな変位であっても比較的余裕をもって対処することができる場合がある。

3 点の動きに現場の土質的な物性値を加味することで、崩落・地すべり等の危険性を評価することができればより現実的なのり面モニタリングシステムとして供用することができる。

④シミュレーション機能の拡張について

シミュレーション機能によりターゲット 3 次元座標および撮影位置を計画時に設定することで、その計画における想定精度を算出することが可能になった。

しかし、撮影位置については依然として経験により決定しており、その結果により精度の推定を実施するという作業手順については、スキルフリーとなっていない。シミュレーション機能をさらに拡張して、すべての撮影可能な位置をベースにして、要求精度を満足するための最適な撮影位置および撮影枚数の組み合わせを自動的に選択して提示するようになれば、撮影計画を立案する段階でもスキルを問わなくなり、土木分野における精密写真測量の普及を加速することができるツールとなる。

⑤ターゲットの耐用年数

ターゲットの設置が困難な岩盤崩落監視とは異なり、のり面の監視においてはターゲットの設置は精密写真測量の普及の妨げにはなっていない。むしろ、長期間の継続監視が可能なようターゲットの耐久性の向上（現状では3～5年であるが要求は10年以上である）が検討課題となっている。

9. 3. 今後の展望

斜面モニタリング手法として精密写真測量は、非常に適した手法である。ただし、ターゲットを使用しないと精度の向上が難しいなど、解決すべき課題は多い。また、土木分野での精密写真測量の適用候補として、現場に進入することのできない土砂災害地での崩壊土量の遠隔計測、崩落可能性の高い斜面の変位計測などターゲットを設置できない現場での計測ニーズは多く存在する。これらのニーズに応えるためにはノンターゲットによる高精度な計測が必要不可欠であり、これを実現するための、さらなる研究と検証が必要である。

謝 辞

ここに、本研究を遂行するにあたり、支えていただいた多くの方々に感謝の意を表したいと思います。

精密写真測量との出会いは、2001年に当時トンネル計測研究会という建設会社を中心に設立した勉強会でした。以来7年の長きにわたり、プログラムの作成、手法の改善、オペレーターの作業負荷の軽減をつづけてまいりました。2004年より京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻ジオフロント環境工学講座に社会人として在籍させていただいたことは、50年の人生の中でも非常に充実したひとときでした。

特に指導教官である京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 大西有三教授には、本論文を取りまとめる機会をいただくとともに、研究室や研究会などで有益なアドバイスいただきました。また研究者としての在り方、生き方についても近くで拝見させていただけたことは、大変に勉強になりました。私の今後の生き方についてのよきお手本とさせていただきたいと思っております。

同大学防災研究所流域災害研究センター 関口秀雄教授には変位量と土質物性値との関連につきまして有益なご指導をいただきました。深く感謝しております。

同大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 須崎純一准教授には色空間の表記方法に関する有益なご指導をいただきました。ここに御礼申し上げます。

同大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 西山哲准教授とは、トンネル計測研究会の参加させていただいて以来、幾度となくご相談に乗っていただき、時には愚痴にもお付き合いいただき感謝しております。ともすれば煮詰まってしまうような状況を乗り切る時に差し伸べていただいた手はとてありがたかったと思っております。

さらに、大西研究室のメンバーの方々には、資料の整理・印刷や、実験の助手を快く引き受けていただき、感謝しております。

現在、私はつくばソフトウェアエンジニアリング株式会社に在職しておりますが、高橋修一社長には、社会人ドクターとして京都大学大学院に在籍するにあたり、物心両面からの温かいサポートをいただきました。40代に入ってから転職で、よもや学位取得にチャレンジすることができるとは夢想すらしておりませんでした。感謝という言葉では言い表しきれない思いでいっぱいです、ありがとうございました。

最後に、研究と仕事という生活を最も身近で応援してくれた妻 明代と3人の娘たちにこの論文を捧げます。

2008年9月30日 村上 治